

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

**DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA DEI MATERIALI**

Ciclo XXIV

Settore Concorsuale di afferenza: 09/D1

Settore Scientifico disciplinare: ING-IND/22

**PROBLEMI DI DIAGNOSTICA E RESTAURO DEI MATERIALI DECORATIVI
NELL'ARCHITETTURA LIBERTY IN EMILIA-ROMAGNA**

Presentata da: ing. Luca Baldazzi

Coordinatore Dottorato

Prof. Ing. Giorgio Timellini

Relatore

Dott. Ing. Elisa Franzoni

Correlatori

**Dott. Ing. Stefania Manzi
Prof. Ing. Franco Sandrolini**

Esame finale anno 2012

Sommario

Parte 1 – Malte e pietre artificiali nell’architettura Liberty.....	1
1.1 Avanguardie nell’uso del cemento.....	1
1.2 Storia ed utilizzi	15
1.3 Ricette storiche.....	39
1.4 Stampi e lavorazioni.....	48
1.5 Trattamenti superficiali	54
1.6 Manufatti in pietra artificiale.....	60
1.7 Degrado	71
Parte 2 - I casi di studio.....	82
2.1 Villino Pennazzi / villa Gina a Bologna.....	82
2.2 Villa Verde a Bologna.....	93
2.3 Albergo Dorando a Carpi	96
Parte 3 – La caratterizzazione delle malte moderne.....	99
3.1 Caratterizzazione del legante nelle malte.....	99
3.2 Caratterizzazione delle malte e protocollo diagnostico.....	115
Parte 4 – Caratterizzazione dei campioni	122
4.1 Tecniche utilizzate.....	122
4.2 Risultati e discussione	123
Parte 5 – Formulazione di malte compatibili	140
5.1 Formulazione di malte compatibili per villa Verde.....	140
5.2 Caratterizzazione delle malte formulate per villa Verde.....	142
6.1 Conclusioni	152
7. Bibliografia	155

Parte 1 – Malte e pietre artificiali nell'architettura Liberty

1.1 Avanguardie nell'uso del cemento

François Louis-Joseph Vicat (1786-1861), ingegnere de *l'École des ponts et chaussées*, nel 1817 provò che l'idraulicità delle calci proveniva dal contenuto d'argilla nella pietra calcarea utilizzata per la cottura. Vicat dimostrò scientificamente la teoria dell'idraulicità attraverso l'indice di idraulicità che gli permise di classificare le calci in calci grasse, idrauliche, eminentemente idrauliche e cementi naturali. Nel 1812 per la realizzazione del ponte di Souillac (Dordogne) Vicat mischiò della calce viva ridotta in polvere con dell'argilla e dopo aver cotto l'impasto ottenuto constatò che il prodotto faceva presa sott'acqua dopo qualche giorno. Vicat designò in seguito più di 300 cave da cui estrarre la pietra per la produzione delle calci idrauliche. Nel 1818, Vicat riassunse le sue scoperte nell'opera *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les béton et les mortiers ordinaires*. Parallelamente, nel resto d'Europa, si sviluppano le prime fabbriche per la realizzazione del cemento naturale. Nel 1824 Joseph Aspdin brevettò il cemento Portland¹, per via del colore grigio chiaro simile a quello della pietra della regione di Portland. Nel 1825 in Inghilterra James Frost aprì una fabbrica a Swanscombe per commercializzare un prodotto chiamato “cemento britannico” (2). Sempre in Inghilterra Charles Francis e John White nel 1840 cominciarono a Newport la produzione del cemento romano detto “di Medina”. Gli ingegneri francesi Lamé e Clapeyron scoprirono nel 1828 le cave di San Pietroburgo e successivamente altri 7 siti su cui costruire le rispettive fabbriche. In Belgio, la prima fabbrica di cemento fu costruita nel 1833, a cui seguirono quelle in Spagna, Italia, Germania, Austria, Polonia, Ungheria, Norvegia, etc. La Francia rimane però il Paese con il maggior numero di fabbriche di cemento d'Europa. La prima fu costruita nel 1827 a Pouilly-en-Auxois (Côte-d'Or) dall'ingegnere Alexandre Lacordaire, mentre la

*Sviluppo
del
cemento*

¹ Le prime osservazioni sulla idraulicità delle malte furono fatte dall'ing. Smeaton che, durante la costruzione di un faro, riuscì a stabilire che la resistenza dipendeva dal contenuto di argilla nei calcari usati per la fabbricazione della calce (1756). Le osservazioni di Smeaton permisero a Parker di brevettare nel 1796 il cemento romano, ottenuto per cottura di calcari marnosi. Nel 1818 Vicat, studiando i prodotti idraulici, confermò l'importanza dell'argilla nei calcari e scoprì che il fattore essenziale per il conferimento dell'idraulicità è la presenza della silice. Il primo vero cemento fu preparato nel 1824 dal muratore inglese Joseph Aspdin per cottura di una miscela artificiale di calcare e argilla; il prodotto prese il nome di “cemento Portland”, per il colore simile a quello della pietra di Portland, in Gran Bretagna. Il cemento di Aspdin però era ottenuto a temperature più basse di quelle odierne, fu il figlio di Aspdin, Guglielmo, che ne aumentò la temperatura di cottura. Nel 1844 Johnson calcolò l'esatta composizione della miscela da sottoporre a cottura per ottenere dei cementi Portland e stabilì che nella cottura si dovesse raggiungere una parziale fusione delle sostanze (clinkerizzazione) (1).

seconda risale al 1832, quando Honoré Gariel e François Garnier aprirono il loro stabilimento a Vassy-lès-Avallon (Yonne). Il successo fu tale che attorno a Vassy si svilupparono altre fabbriche di cemento che rifornivano tutto il nord della Francia. La fabbrica di Gariel e Garnier chiuse nel 1888, mentre tutte le altre si unirono nel 1904 sotto il nome di “cemento di Vassy” e chiusero solo nel 1960 (2). In Figura 1 ed in Tabella 1 viene riportato lo sviluppo delle fabbriche di cemento in Europa e le principali città sede di cementifici.

Il “cemento naturale” fu inizialmente usato come aggiunta alla calce ed in seguito per la realizzazione di calcestruzzi impiegati per pali di fondazione e per il restauro di murature e sculture negli edifici storici come le cattedrali di Amiens, Bruges (restaurate tra il 1830 ed 1840) e San Fedele a Milano (qualche anno più tardi). Nello stesso periodo il cemento ebbe un grande successo nella realizzazione di canalizzazioni prefabbricate (ad esempio i serbatoi d’acqua e le condotte di Parigi, Rennes, Orléans, Nizza, etc.), in opere idrauliche come canali, fondazioni e stazioni interrato (canali Saint-Martin, Saint-Denis, fondazioni dell’acquedotto di Honfleur nel 1842, le stazioni della metropolitana di Parigi, etc.), in decori artistici a stampo e nelle modanature tirate al modano. L’Inghilterra fu il primo paese a sostituire lo stucco con un impasto di calce e cemento per la realizzazione di questo tipo di decorazioni, a causa dell’eccellente tenuta, facilità di messa in opera e basso costo del cemento².

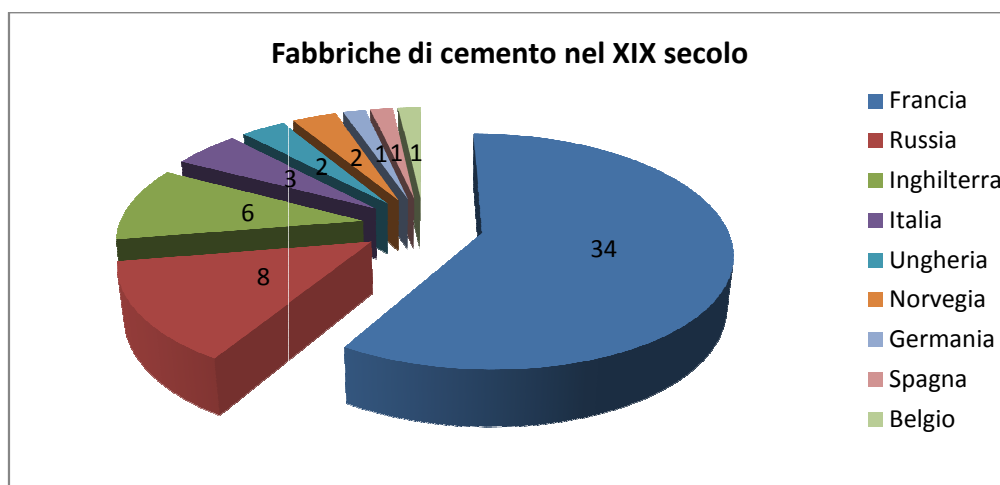


Figura 1 Fabbriche di cemento nel XIX secolo (2).

² Alcuni esempi di tali applicazioni sono: le cornici delle aperture di Wycombe Abbey (High Wycombe) realizzate dall’arch. James Wyatt, le modanature di Castle House di Woodbridge (Suffolk) costruite nel 1805 da William Lockwood, la residenza neogotica di Walsingham Abbey (Norfolk) attribuita a Haverfield e gli edifici di Regent’s Park a Londra realizzati da John Nash nel 1811. La torre ottagonale nel castello di Hadlow (Kent), fatta costruire da Walter Barton Mai a George Ledwell Taylor nel 1830, presenta una malta di allettamento per la muratura in cemento romano e le decorazioni delle aperture e dei pinnacoli neo-gotici sempre con una malta di cemento romano (2).

Francia	Angely (Yonne)		Francia	La Valentine (Marseille) Dumas e Berger, 1855
Francia	Antony (Hauts-de-Seine)		Francia	Valbonnais (Isère)
Francia	Argenteuil (Val-d'Oise) Velleret, 1846		Francia	Vassy-lès-Avallon (Yonne) Honoré Gariel e François Garnier, 1832
Francia	Avallon (Yonne)		Francia	Vif (Isère) Benoît Berthelot, 1849
Francia	Boulogne (Pas-de-Calais) Dupont e Demarle, 1846		Germania	Ulm (Wurtemberg)
Francia	Buttes-Chaumont (Paris)		Inghilterra	Londra
Francia	Cahors (Lot) Pellegrini, 1835		Inghilterra	Sheppey island (Kent) J. Parker, J. Wyatt, 1796
Francia	Champréau (Yonne)		Inghilterra	Nine Elms (Vauxhall)
Francia	Charonne (Paris)		Inghilterra	Leeds (Yorkshire)
Francia	Chouard-Angely (Yonne)		Inghilterra	Swanscombe (Kent)
Francia	Corbigny (Nièvre)		Inghilterra	Newport (Wight island)
Francia	Courterolles (Yonne)		Belgio	Niel
Francia	Fresnes (Seine-et-Marne)		Spagna	Zumaya
Francia	Gap (Hautes-Alpes)		Italia	Alzano (Bergamo)
Francia	Grenoble Porte de France (Isère) capt. Breton, J. Arnaud (1842)		Italia	Casale Monferrato
Francia	Lesquibat (Lot-et-Garonne)		Italia	Giudecca (Venezia)
Francia	Montreuil-sous-Bois (Seine-Saint-Denis)		Norvegia	Bagaas Christiana
Francia	Les Moulineaux (Seine)		Norvegia	Langoen
Francia	Narbonne (Isère)		Ungheria	Buda
Francia	La Pérelle (Isère) J. Vicat, 1875		Ungheria	D'Espérie
Francia	Pouilly-en-Auxois (Côte-d'Or) A. Lacordaire, 1827		Russia	San Pietroburgo
Francia	Provency (Yonne)		Russia	Schmidt
Francia	Rocquefort (Bouches-du-Rhône) H. de Villeneuve-Flayosc, 1836		Russia	Tscerkasoff
Francia	Saint-Bauzille (Hérault)		Russia	Podolsk
Francia	Thisy (Yonne)		Russia	Rosche
Francia	Uriage (Isère)		Russia	Liphard
Francia	Vif (Isère) Berthelot, 1849		Russia	Glouchoosersky
Francia	Vimines (Savoie)		Russia	Noworossiisk
Francia	Vitry-le-François (Marne) Rozet e Menisson, 1850			

Tabella 1 Città sedi di fabbriche di cemento nel XIX secolo (2).

In Italia i principali edifici con decorazioni in cemento naturale si trovano a Torino, dato che inizialmente il cemento veniva importato dalla Francia (in particolare da Grenoble). I principali esempi sono: il palazzo reale di Torino; il castello del Valentino; gli edifici in via Belfiore, Regina Cristina, Micca; l'immobile delle Assicurazioni Generali; il palazzo moresco Bellia dell'arch. Carlo Ceppi (1892); gli edifici Liberty di Giuseppe Sommaruga, Giuseppe Arata e Luigi Boggi. A Vienna le cornici in cemento realizzate con il modano ebbero un grande successo tanto da essere state realizzate per circa il

70% degli edifici. Gottfried Semper utilizzò questa tecnica per costruire l'Accademia di Belle Arti di Vienna nel 1873, esempi simili possono essere ritrovati anche nell'Europa dell'est come in Slovacchia, nella Repubblica Ceca ed in Polonia³.

Il cemento naturale fu utilizzato anche per la produzione di blocchi, mattoni ed oggetti decorativi a stampo. In Francia l'utilizzo delle pietre artificiali conobbe un particolare successo a partire dal 1850 in città come Grenoble, dove il costo dei mattoni in cemento era quattro volte inferiore a quello delle pietre naturali, nonostante alcuni detrattori (come Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc) ne contestassero la finzione. Il calcestruzzo utilizzato per gli stampi era composto da metà od un terzo di cemento pronto e da metà o due terzi di sabbia e ghiaia rotonda. A partire dal 1860, si aggiungeva anche una parte di cemento naturale a presa lenta per rallentare complessivamente la presa dell'impasto. Anche in Francia, così come in Italia, la tecnica era presa direttamente dalle lavorazioni in gesso. Nelle regioni di Vassy, Pouilly e Grenoble (dove erano presenti importanti fabbriche di cemento), il cemento naturale sostituì rapidamente la pietra. A Grenoble alcuni esempi sono: i decori a stampo nel castello di Murinais (distrutto), costruito dall'arch. Alfred Berruyer nel 1850; la chiesa di San Bruno (1869) dello stesso architetto; i decori con teste di elefante ed altri motivi floreali della casa del cementista Anatole Berthelot (1900) (2).

Il cemento naturale

I cementi naturali sono ottenuti dalla cottura di calcari marnosi con un contenuto di argilla compreso tra il 20% ed il 35%. I cementi artificiali invece presentano il grande vantaggio di essere perfettamente dosati essendo ottenuti a partire da calcari puri a cui viene aggiunto il 21-22% di argilla. All'interno di questa categoria si distinguono il cemento a presa rapida (pronto) e quello a lenta presa, a seconda della temperatura di cottura e del quantitativo di argilla presente. Infatti a parità di marna si potevano ottenere prodotti differenti: cementi a presa rapida con basse temperature (750°C-900°C), cementi a lenta presa con temperature più alte (900-1200°C). Tra il 22 ed il 24% di argilla si hanno i cementi a presa rapida, il cui dosaggio ideale è il 22,5%; tra cementi a presa lenta e cementi pronti ci sono diversi prodotti intermedi (semi-lenti e semi-rapidi) che sono ottenuti per lo più attraverso la miscelazione tra cemento a lenta e rapida presa. Il cemento a presa rapida è utilizzato soprattutto per modellature a stampo,

³ Zsigmund Melczer ne fa uso a Bratislava (Slovacchia) all'inizio del '900, Achille Wolf e Antonin Wiehl la utilizzano per costruire l'hôtel Boscolo di Praga (Repubblica Ceca) nel 1887, Germano Wanderley per gli immobili neo-rinascimentali di via Schodová nel 1899 e Wilhelm Dvorák per svariati edifici tra cui quelli di via Masarykova a Brno (Repubblica Ceca) nel 1900. A Cracovia Jan Zawiejski fu un grande promotore del cemento come testimonia il suo edificio Art Nouveau per l'Accademia del commercio in via Kapucynska nel 1904 (2).

sigillature, tubi, architravi di porte e finestre, etc. Oltre al cemento pronto esistevano anche altri tipi di cemento a presa rapida con una percentuale di argilla compresa tra il 24% ed il 26% (cemento d'Uriol nel Delfinato e cemento de *la Valentine* e di Roquefort nella regione marsigliese). Questi cementi hanno il vantaggio di far presa molto rapidamente, ma rischiano di degradarsi più facilmente in seguito. I cementi ottenuti dalla miscela di calce con loppa d'altoforno erano invece utilizzati nelle fondazioni e per il conglomerato cementizio armato (3).

Il cemento naturale pronto (CNP) è un legante idraulico ottenuto dalla semplice cottura tra 600°C e 1200°C di calcari argillosi (marne) di composizione il più possibile regolare (le pietre utilizzate per la fabbricazione dei cementi naturali nel XIX secolo avevano una composizione chimica molto variabile a causa della diversa qualità dei giacimenti, variabile da una regione all'altra), seguito da una macinazione molto fine. Attualmente il solo cemento naturale rapido prodotto è quello della ditta Vicat a Grenoble che risponde alla normativa francese NF P 15-314.

Il forno aveva, nella versione originaria, una forma ovale con una bocca d'alimentazione superiore ed un trabocchetto di scarico inferiore dato che le pietre ed il carbone erano caricati dall'alto. Nella parte alta del forno si trovavano gli elementi non cotti, al centro gli elementi in cottura e nel fondo gli elementi già cotti. Il forno andava rialimentato in continuo. Le pietre restavano nel forno per circa un giorno e mezzo. Dopo la cottura si potevano ottenere quattro tipi diversi di prodotto in funzione della temperatura di cottura (2):

- i grani non cotti, di colore grigio-nero simile alla pietra di origine, che non avevano superato la temperatura di 570°C e quindi non erano reattivi;
- i grani poco cotti, di colore grigio chiaro-giallo, che avendo subito una cottura tra 570°C e 730°C, potevano presentare attività pozzolanica e produrre C-S-H a lungo periodo se combinati con la calce;
- i grani cotti, di colore giallo-arancio (cottura tra 730°C e 1300°C) che consentivano una presa ed un indurimento rapido del cemento (composti principalmente da calce, C_2S in formazione, MgO , C_2F_7 , C_3A con impurezze silicee e magnesiache);
- i grani sovra cotti, di colore bruno-nero e molto duri (cottura >1300°C), che avevano subito una fusione parziale accompagnata dalla formazione di fase vetrosa. La microstruttura di questi grani si avvicinava a quella di un cemento Portland con grani composti principalmente da C_2S , C_3A , C_4AF e tracce di C_3S .

Questo cemento era in seguito macinato in macinatrici a palle e omogeneizzato prima della spedizione al fine di ottenere una qualità regolare. La composizione mineralogica del cemento naturale è descritta in Figura 2 ed in Tabella 2. La composizione di un cemento Portland ed un cemento pronto attuale, determinata tramite XRF, è riportata in Tabella 3. Il cemento pronto presenta tenori di Al_2O_3 , MgO e SO_3 nettamente più elevati di un Portland (a causa del particolare tipo di pietra utilizzata, composta da strati sedimentari deformati e piegati di origine tettonica che si sono formati durante l'orogenesi alpina) ed una concentrazione in CaO più bassa (2).

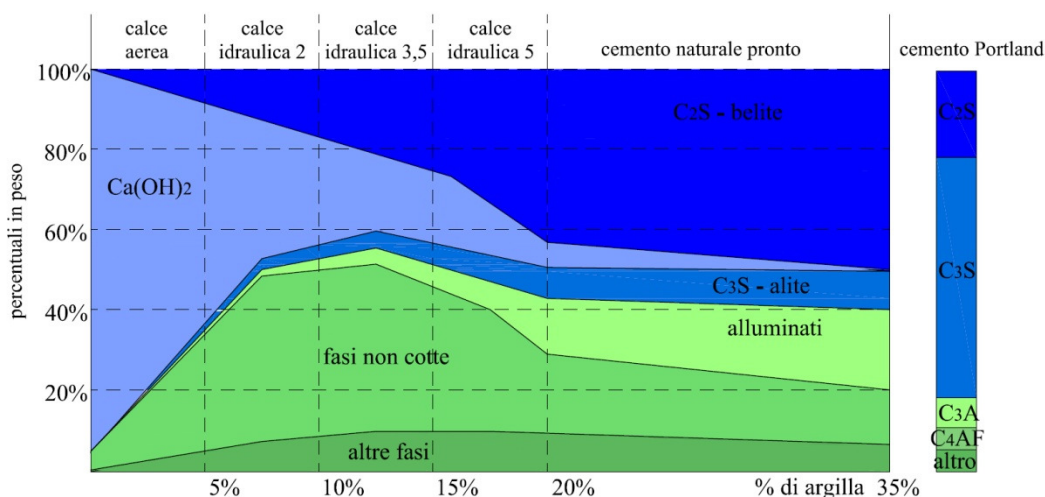


Figura 2 Composizione mineralogica delle calci aeree, idrauliche, cementi naturali e Portland (2).

Legante	Calce		Cemento naturale pronto
	Calce aerea (CL)	Calce idraulica (NHL)	(CNP)
% d'argilla	<5%	5-20%	20-35%
Tipo di forno	Verticale	Verticale	Verticale
Temperatura di cottura	<1200°C	<1200°C	<1200°C
Tempra	Debole	Debole	Debole
Idratazione/estinzione dopo la cottura	Si	Si	No
Minerale principale	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\text{C}_2\text{S} + \text{Ca}(\text{OH})_2$	C_2S
Idraulicità	No	Si	Si
Colore	Bianco	Bianco-grigio chiaro	Giallo ocra-bruno

Tabella 2 Caratteristiche delle calci aeree, idrauliche e dei cementi naturali (2).

Elementi	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)
Portland	22,2	4,1	4,5	67,0	1,0	0,9	0,3	0,0
CNP	20,0	8,7	3,5	59,5	4,6	2,4	0,9	0,2

Tabella 3 Composizione di un cemento Portland ed un cemento pronto ottenuta tramite XRF (2).

La fase principale del cemento naturale è il silicato bicalcico (C_2S) compreso tra il 40 ed il 60%, seguito dagli alluminati di calcio (20%). Il primo conferisce al cemento le proprietà di resistenza a compressione a medio e lungo termine, mentre il secondo è responsabile della presa e dell'indurimento rapido. Il tempo di presa molto basso fa sì

che già dopo soli 15 minuti (a 20°C) sia possibile raggiungere la resistenza di 4 MPa con la quale è possibile disarmare il getto. Dopo una crescita molto rapida, la resistenza a compressione continua a crescere più lentamente per un periodo molto più lungo: per malte preparate con rapporto acqua/cemento 0,38 e sabbia/cemento 1:1 si possono ottenere resistenze a compressione pari a 32 MPa dopo 28 giorni e 60 MPa dopo circa 10 anni (4).

Se lo sviluppo industriale del cemento arriverà solo più tardi con l'invenzione del forno rotativo (1877) e della macinatrice a palle (1892), è anche grazie alla creazione dei grandi cantieri voluti da Napoleone III per la realizzazione di parchi nelle grandi città⁴, che si sviluppano nuove figure professionali come quella dell'artigiano cementista specializzato in *rocaille* (*rocailleur*) che realizza sotto la guida degli ingegneri *des Ponts et Chaussées* pietre artificiali resistenti alle intemperie e all'usura, elemento base dei nuovi giardini pittoreschi. La forte sperimentazione in tale settore è testimoniata dal fatto che una delle prime applicazioni di conglomerato cementizio armato riguarda proprio opere di *rocaille*. Era dunque possibile sperimentare nuove tecniche che poi venivano riproposte in scala maggiore. Furono Joseph Louis Lambert (1814-1887, agricoltore di Carcès, Var) e Joseph Monier⁵ che, essendo giardinieri e conoscendo bene

*I giardini
in
rocaille*

⁴ Il giardino roccioso conosce un grande successo durante tutto il XIX secolo in seguito alle prime grandi scoperte geologiche, alla scalata del monte Bianco nel 1786 ed allo sviluppo di nuovi mezzi di trasporto come il treno, che permettono di scoprire questi nuovi paesaggi e di trasportare i materiali con maggiore facilità. Due differenti utilizzi delle pietre artificiali sono presenti nei giardini europei tra il XVIII ed il XIX secolo: le pietre artificiali che imitano perfettamente quelle naturali e le pietre artificiali che ricreano scenari strani senza un vero e proprio scopo imitativo. Nel primo caso l'intento imitativo è volto a riprodurre copie geologicamente esatte della montagna scelta anche attraverso l'accostamento con specie vegetali tipiche di quel contesto. Per esempio nel 1837 Lady Broughton immagina per il suo giardino a Hoole House di riprodurre in miniatura il massiccio di Chamonix, mentre Joseph Paxton a Chatsworth nel 1842 realizza un giardino ad imitazione delle rocce di Strid a Bolton. Per il secondo caso, alcuni esempi sono i ponti di rocce a Stourhead e Painshill in Inghilterra. Nel 1824 (anno in cui Aspdin deposita il brevetto del cemento Portland), James Pulham mette a punto un procedimento per realizzare pietre artificiali, che il figlio utilizzerà per realizzare i decori ad imitazione del granito aggiungendo al cemento pezzi di mattone e di pietre da demolizione, nel giardino in *rocaille* a Hoddesdon Hall. Nel 1848 Pulham abbandona progressivamente la fabbrica di cemento per dedicarsi completamente alla realizzazione di rocce artificiali utilizzando il cemento Portland per legare tra loro blocchi di recupero e per assicurare un dettaglio artigianale che imita le formazioni geologiche in tutti i loro dettagli (5).

⁵ Joseph Monier è nato a Saint-Quentin-la-Poterie nel 1823. Dal 1842 è giardiniere presso il duca d'Uzès, poi a Parigi. In seguito è impiegato come giardiniere a Strasburgo, a Versailles dal 1852 al 1853, poi a Hyères nel 1854. Successivamente crea un'impresa a Parigi realizzando dei piccoli padiglioni nei parchi e delle costruzioni rustiche. Diventato membro della Società d'orticoltura di Francia nel 1866, l'anno successivo deposita un primo brevetto per un sistema di "*caisses-bassins mobiles en fer et ciment applicables à l'horticulture*" per sostituire le casse in legno. Monier continuerà a produrre nuovi brevetti: "*panneaux mobiles en ciment et en fer servant pour la clôture des bâtiments*" (1869), "*ponts et passerelles de toutes dimensions*" (1873) e nel 1877 delle putrelle. Dopo avere avuto diversi riconoscimenti alle esposizioni, Monier si associa nel 1878 ad una ditta austriaca che prende il nome di Monier-Schuster. Nel 1884 vende i diritti di sfruttamento delle sue invenzioni ad una ditta tedesca. Nel 1886, Monier costruisce a Nizza una casa resistente ai sismi, ma i suoi affari vanno in declino e nel 1888

il mondo vegetale, pensarono di aggiungere delle fibre metalliche ad una malta, creando un prototipo di conglomerato cementizio armato. Nel 1865 Combaz, imprenditore in pietre artificiali, arma le stalattiti del parco *Buttes-Chaumont* di Parigi e Monier realizza i suoi primi piccoli padiglioni in cemento. La tecnica della *rocaille*, utilizzata nei primi cantieri pubblici di Parigi (inizio 1850), consisteva nell'unire pietre di piccola pezzatura tramite malta di cemento per ottenere pietre più grandi, poiché piuttosto che trasportare i grandi massi, si preferiva creare direttamente in sito le pietre artificiali della forma desiderata. Gli artigiani cementisti per ricreare delle concrezioni particolari come stalattiti, stalagmiti o rami in legno aggiungevano dei fili di ferro ed armature, accumulando strati di cemento e scolpendoli ogni volta più finemente. Durante la realizzazione del *bois de Boulogne* (1853-1865) comparvero le prime opere in cemento, in quanto risultava molto più economico creare in sito le pietre che trasportare i grandi massi di grès da Fontainebleau. Il procedimento, che fu messo a punto per la prima volta per ricreare le rive di un ruscello, consisteva nel formare dei blocchi grossolani in muratura, composti da pezzi rustici con malta di calce e sabbia, ai quali si dava la forma a poco a poco applicando degli strati di cemento. Il cemento doveva restare fluido per poter essere proiettato con la cazzuola sulle pietre od i giunti e per poter essere rifinito con un pennello. Il cantiere per il parco *Buttes-Chaumont* (1866-1869) è uno dei migliori esempi nell'utilizzo delle pietre artificiali, con la sua falesia di 15 m d'altezza, 50 m di lunghezza e 2 m di spessore (Figura 3). Sempre in cemento sono anche l'invaso del lago, le scale con 173 gradini (Figura 4), i due ruscelli, la grotta con le stalattiti giganti (Figura 5), le cascate (Figura 6) e le numerose barriere in finto legno (Figura 7, Figura 8). Per le stalattiti M. Combaz utilizzò delle armature vincolate alla volta, riunite in punta a forma di piramide. Su queste armature, che venivano poi legate tra loro con una maglia di fil di ferro, si proiettava la malta per strati successivi tramite una pompa. Gli artigiani cementisti specializzati in *rocaille* a Parigi erano solo quattro tra il 1845 ed il 1850, una decina nel 1900 (tra cui Malaure, che lavora per la cascata del *bois de Boulogne*, Figura 9 e Figura 10, Combaz, che lavora anche per il parco *Buttes-Chaumont*, Redont attivo anche a Reims, Lecardeur⁶ attivo in Limousin). Il numero di

dichiara fallimento. In seguito cercherà di riconvertirsi in studio tecnico, ma imprese meglio organizzate sul piano commerciale come Hennebique e Coignet sono ormai sviluppate in tutta la Francia. Monier muore in rovina nel 1906 (5).

⁶ Gabriel Lecardeur è nato a Croze nel 1835. Immigrato a Parigi, ha probabilmente collaborato con altri artigiani cementisti nei primi grandi lavori di abbellimento di Parigi. Per l'esposizione del 1889 gli vengono affidati diversi lavori, in particolare al Trocadéro e ai piedi della torre Eiffel. In provincia esegue

rocailleurs parigini però decrebbe molto rapidamente col tempo fino a sparire negli anni '30. L'uso del cemento diventò così riservato agli ingegneri ed agli architetti che lo utilizzavano durante il periodo Art Déco per effetti di maniera interessanti prima di adottare l'estetica del movimento moderno che esclude ogni forma di ornamento (5).



Figura 3 M. Combaz, falesia nel parco Buttes-Chaumont (1866-1869), Parigi.



Figura 4 Scalinata nel parco Buttes-Chaumont (1866-1869), Parigi.



Figura 5 M. Combaz, grotta con stalattite (in alto a sinistra) nel parco Buttes-Chaumont (1866-1869), Parigi.

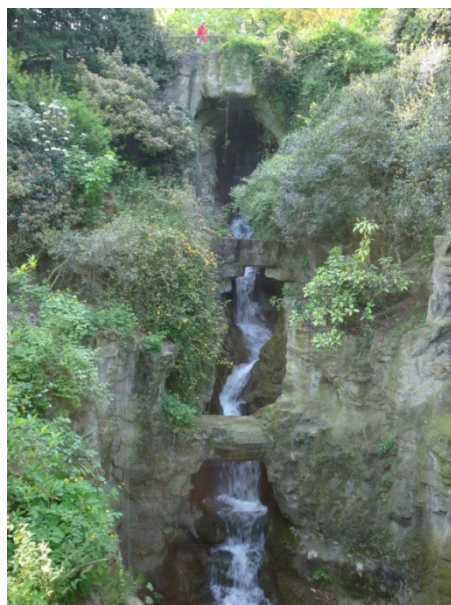


Figura 6 M. Combaz, una delle numerose cascate del parco Buttes-Chaumont (1866-1869), Parigi.

diversi lavori come i castelli e le case in Limousin dove risiede. Membro dell'Accademia delle scienze naturali, della Società dei cementi di Francia, della Società di orticoltura e dell'Accademia delle arti decorative, Lecardeur scrive anche un piccolo testo di 22 pagine illustrate sui lavori in *rocaille*: “*L'Art de la rocaille, les roches, rivières et travaux rustiques*” (5).



Figura 7 Barriera in *rocaille* nel parco Buttes-Chaumont (1866-1869), Parigi.



Figura 8 Particolare della barriera in *rocaille* nel parco Buttes-Chaumont (1866-1869), Parigi.



Figura 9 M. Combaz e Malaure, *Grandes Cascades*, Bois de Boulogne, Parigi.



Figura 10 M. Combaz e Malaure, *Grandes Cascades*, vista dall'interno della cascata, Bois de Boulogne, Parigi.

Nel 1867, mentre Combaz realizzava le pietre artificiali per il parco *Buttes-Chaumont* e Monier depositava il suo primo brevetto (casce in ferro e cemento per l'agricoltura), a Marsiglia erano presenti già 8 artigiani cementisti molto attivi sul mercato, come Stanislas Cailhol⁷. Attorno Marsiglia e nel Sud-Est della Francia il modello del giardino borghese del Secondo Impero si incrociò con quello popolare e grottesco, tipico del contesto locale. L'afflusso nella regione di muratori immigrati provenienti dall'Italia fu una delle possibili cause di una tale varietà di temi e di interpretazioni⁸. Tra la

⁷ Stanislas Cailhol è nato a Marsiglia nel 1814. Figlio di un piccolo scultore, è uno dei primi artigiani cementisti di Marsiglia. Cailhol è il costruttore di una delle più interessanti case in *rocaille*, un'antica casa di campagna in traverse des Reymonds (Saint-Marcel, Marsiglia) realizzata nel 1863, con tre facciate differenti. Sempre nello stesso anno realizza a Parigi il ristorante "la Cascade", celebre per le sue decorazioni. Nel 1864 realizzerà invece la casa all'Estaque, Marsiglia (5).

⁸ Tra questi Gaëtan Amoletti, Philippe Ughetto e David Gagliardone.

generazione di artigiani che lavorava per i grandi cantieri del Secondo Impero e la generazione che lavorava all'inizio del '900, si mise in atto una trasformazione dovuta in parte all'evoluzione della clientela ed all'evoluzione dei criteri estetici. All'inizio del XIX secolo si sviluppò inoltre la moda della seconda casa in campagna (a Endoume, Roucas-Blanc, Saint-Barnabé, Saint-Julien, Montolivet o all'Estaque) accessibile a fasce sempre più ampie della borghesia. Le forme di queste case erano molto diverse tra loro, da quelle in stile coloniale a quelle rustiche, da quelle all'italiana a quelle neogotiche. Con il loro desiderio di grandezza applicato a dimensioni modeste e a volumi semplici, ciascun proprietario trasformava il proprio villino in un luogo ideale dove mischiare elementi decorativi artigianali ed industriali. All'inizio del XIX secolo si ebbero dunque tutte le condizioni affinché si sviluppasse la lavorazione delle pietre artificiali: una nuova classe borghese sempre più ricca grazie alle colonie aveva a disposizione nuove somme da investire, il gusto per l'esotico e per i luoghi di piacere, lo sviluppo dei trasporti (*tramway*), la distribuzione dell'acqua, la nascita di un nuovo materiale come il cemento che offriva ampie possibilità di espressione riducendo i costi ed i tempi di lavorazione. Inoltre proprio nel sud della Francia la disponibilità nelle vicinanze sia di miniere di calcari marnosi adatti per la produzione di cemento che di carbone, usato come combustibile, permise uno sviluppo molto rapido dei cementifici⁹.

Gaëtan Amoletti (Endoume, 1860 – 1911) appartiene ad una figlia di muratori di origini genovesi immigrati a Marsiglia da diverse generazioni.

Philippe Ughetto (Bois-Lemaitre, 1868 - ?) è figlio di un giardiniere torinese anch'egli immigrato a Marsiglia, realizzò diversi portali e muri in finto legno nel quartiere in cui abitava (Saint-Julien), oltre alla sua abitazione denominata "La Rocaille".

David Gagliardone (Treviso, 1863 - ?) ha vissuto nel Monferrato dove a soli 10 anni inizia a lavorare per la realizzazione di monumenti funerari in cemento. Successivamente la famiglia si trasferisce in Francia. A Roucas-Blanc realizzano la villa Costa, al castello Collet realizzano una scalinata monumentale un cascata ed una facciata di un edificio, mentre per la chiesa di Notre-Dame-du-Mont a Saint-Loup lavorano alla facciata (5).

⁹ Nel sud della Francia fino al 1928 si contavano 25 cementifici, di cui 3 vicino a Nizza che producevano il 30% dell'intera zona e 22 cementifici vicino a Marsiglia che producevano il restante 70%. I cementifici del sud della Francia coprivano complessivamente il 27% della produzione nazionale ed erano quindi il gruppo più importante. Tale sviluppo era dovuto alla presenza di calcari marnosi di buona qualità come quelli presenti nell'Aptien a La Bedoule (tra Aubagne e Cassis), nel massiccio di Carpiagne, nella vallata dell'Huveaune, nel bacino del Fuveau, all'Estaque e a Fos-sur-Mer. Inoltre si potevano trovare un po' dappertutto accanto a dei calcari puri anche delle argille per la fabbricazione del cemento artificiale. Sempre nella stessa zona era disponibile un combustibile economico costituito da carbone e lignite del bacino di Fuveau (80 km dalle fabbriche più lontane). Il resto del combustibile era fornito dalle polveri di coke del gas e dai residui delle caldaie a carbone (locomotive, vetrerie, fucine, etc.). Questo tipo di carbone non costava quasi nulla, solo il costo del trasporto (su rotaia o gomma). La richiesta di calce e cemento a Marsiglia era particolarmente forte in seguito alla trasformazione di vecchi quartieri, lo sviluppo delle periferie e l'esportazione verso l'estero facilitata dalla presenza del grande porto. Anche a Nizza la presenza di cave con calcari marnosi e di un porto commerciale per le esportazioni ha favorito lo sviluppo dei cementifici, ma a differenza di Marsiglia il combustibile non era direttamente disponibile sul posto tranne le polveri di coke provenienti dalle fabbriche del litorale. Diversamente da Marsiglia, la

Il lavoro di cementista non veniva insegnato nelle scuole professionali, ma veniva insegnato in cantiere. Del resto, la gran parte dei cementisti, provenendo da classi sociali povere, non aveva un'istruzione professionale vera e propria: alcuni erano andati a scuola fino a 12 anni oppure erano del tutto analfabeti. Forse anche per questo il mestiere di cementista non veniva riconosciuto artisticamente quanto il lavoro di uno scultore o di un pittore. Per la realizzazione degli elementi in *rocaille* venivano generalmente realizzati tre strati di malta. Inizialmente si rivestivano i mattoni o le pietre (nel caso di un elemento architettonico di discrete dimensioni) con uno strato grossolano di malta, si regolarizzavano gli spigoli e si tirava il secondo strato di malta più fine. Infine dopo aver steso l'ultimo strato di malta finissima si realizzava il decoro in *rocaille* con delle cazzuole di dimensioni differenti, delle spatole, un pezzo di legno tagliato in punta (per ricreare i nodi del legno) ed uno scopettino d'erica. La maggior parte dei motivi erano scolpiti sul cemento fresco, tranne qualche dettaglio ripetitivo che veniva realizzato con degli stampi. Per il primo tipo di elementi era preferito il cemento Portland, in quanto garantiva all'artigiano maggior tempo per incidere la superficie (la presa durava alcune ore). Gli elementi a stampo invece potevano essere realizzati anche con cemento romano poiché non essendoci la necessità di lavorare la malta allo stato fresco, il tempo di presa molto rapido (circa 15 minuti) permetteva di sformare prima l'elemento stesso. Successivamente l'elemento veniva colorato; ad esempio, per ottenere una colorazione verde oliva servivano: 1 g di nero fumo o nero di Anversa, 300 g di ocre gialla, 500 g di ocre rossa. Questo impasto veniva applicato "a colpi di frusta" con un grosso pennello sulla superficie, ed in seguito si applicava dell'allume disciolto nell'acqua per fissare i pigmenti. L'attività degli artigiani cementisti però non durò che due generazioni, giusto il tempo per permettere all'industria di sviluppare e perfezionare nuove tecnologie per la realizzazione di ogni genere di decoro. Già nel 1914 un fabbricante di cemento ricordava delle facciate interamente decorate a stampo con cemento bianco, senza che lo scultore avesse dovuto dare un solo colpo di scalpello (5).

*Le
facciate
con
intonaci
di
cemento*

L'origine delle facciate con intonaci di cemento è incerta. Si pensa che risalgano approssimativamente alla metà del XIX secolo, dal momento che il brevetto di fabbricazione della calce idraulica a Marsiglia, detta di Roquefort (Tocchi, chimico e de Villeneuve, ingegnere minerario), è del 1841. Nel 1847, l'architetto Victor Leroy nel

possibilità di potere esportare il cemento prodotto localmente era molto limitata a causa di una forte richiesta locale (3).

testo “*Notice sur les constructions des maisons à Marseille au XIX^e siècle*” segnalava che il cemento Roquefort essendo molto leggero, e potendo ricevere due parti di sabbia, risultava economico. Il suo utilizzo principale era per opere idrauliche, come nel caso di riparazione di cisterne, acquedotti, condotte d’acqua, fondazioni.

A Marsiglia, le facciate in intonaco di cemento sono così chiamate perché l’intonaco, invece di essere a base di calce e sabbia come per gli edifici antichi, era a base di cemento colorato in massa dalla sabbia o da pigmenti coloranti che entravano nella ricetta (come mattoni macinati, pezzi di pietra, etc.). Anche quando era inciso a fresco nella sua espressione più semplice, questo tipo di intonaco tendeva ad imitare la pietra naturale nella tessitura, nel colore e nella forma. L’intonaco di cemento si sostituiva all’intonaco tradizionale di calce e sabbia durante i lavori di ordinaria manutenzione o trasformazione. Gli intonaci di cemento venivano prodotti su catalogo dai cementisti stessi (per esempio, Désiré Michel¹⁰) o da piccole imprese artigianali, che avevano eseguito fino ad allora solo intonaci tradizionali, visto il loro grande successo. Come in Italia, anche in Francia, le ricette per la realizzazione dell’intonaco o delle decorazioni a modano o stampate erano tenute segrete dai cementisti ed è quindi molto difficile oggi reperire i quaderni su cui gli artigiani prendevano nota del loro lavoro. I brevetti per gli intonaci di cemento possono essere divisi in due categorie: le facciate con intonaci di cemento propriamente detti e le facciate in pietra artificiale.

Le facciate con intonaci di cemento sono le più numerose, ma anche le più difficili da riconoscere e da descrivere. Il documento più affidabile sono le targhette dei cementisti ancora visibili sui muri (Figura 11 - Figura 12) ed i cataloghi dei cementisti. Questo tipo di edifici li si riconosce dal colore grigio-giallo dell’intonaco, dalla modanatura incisa come lo stesso intonaco o eseguita in aggetto, dalla cornice di coronamento e dal piccolo basamento. Le facciate infatti potevano essere decorate in maniera più o meno

¹⁰ La storia professionale di Désiré Michel comincia nel 1838 quando Amédée Armand acquista una concessione mineraria a Valdonne e fonda la *Société Michel, Armand et C^{ie}*. Sin dal 1839, l’avviamento di questa società si rivela brillante grazie alle tecniche di trivellazione rivoluzionarie. La società inizialmente estrae lignite poi, una decina d’anni più tardi, dei calcari utili alla fabbricazione del cemento. Questa attività risulterà remunerativa per tutta la seconda metà del XIX secolo. Alla fine del XIX secolo la fabbricazione di cemento fu abbandonata e la società vendette la fabbrica alla *Société des Portlands méridionaux*, che nel 1901 si unì con la società *J. et A. Pavin de Lafarge*. Tra le attività svolte all’interno di questa società Désiré Michel si consacrò alla promozione del cemento sia come fornitore che come imprenditore indipendente. Tra le altre società parallele create da Désiré Michel, la principale fu la compagnia *Désiré Michel et Cie* o *Compagnie du ciment de la Méditerranée* che esercitò le sue attività tra il 1859 ed il 1886. Nel 1863, Désiré Michel pubblicò un catalogo illustrato che descriveva le sue principali realizzazioni, come le decorazioni per edifici civili e religiosi costruiti tra il 1858 ed il 1862. In seguito Michel si associò ad altri produttori di cemento per fondare la *Compagnie marseillaise des ciments du Midi* (1879) (6).

ricca, in base ai gusti ed alla disponibilità economica del proprietario. Le facciate in pietra artificiale invece sono facilmente identificabili dato che imitano la tessitura ed il colore delle pietre degli immobili vicini. Come inerte, invece della sabbia o dell'inerte di media pezzatura, si potevano aggiungere anche pezzi di pietra di dimensione maggiore o ghiaia (6-8).



Figura 11 Edificio in *rue des Muettes*, 20, Marsiglia (gentile concessione del *Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques*, LRMH).



Figura 12 Brevetto su targhetta dell'edificio in *rue des Muettes*, 20, Marsiglia. *Ciment de la Méditerranée* - Désiré Michel & C^{ie}, Marseille, 1860, *rue Consolat* N°3, (gentile concessione di LRMH).

1.2 Storia ed utilizzi

L'interesse nei confronti del restauro del Moderno nasce dall'esigenza di conservare edifici e decorazioni realizzate a partire dalla fine del XIX secolo per la tutela di tale patrimonio architettonico nelle varie forme che assunse in Europa (Liberty in Italia, *Art Nouveau* in Francia e Belgio, *Jugendstil* in Germania, la scuola di Glasgow in Scozia, etc.). Tale tematica pone gli addetti del settore di fronte a nuove problematiche legate alla identificazione di malte cementizie ed alla formulazione di malte di ripristino compatibili con esse. Sin dal barocco molte decorazioni venivano realizzate utilizzando materiali poveri attraverso la cosiddetta tecnica dello stucco, inoltre era assai frequente imitare i diversi materiali lapidei utilizzando delle ossature di mattone ricoperte da malta di calce aerea successivamente tinteggiata o stuccata. Con l'avvento del cemento queste tecniche furono ben presto sostituite, poiché il nuovo legante consentiva risultati migliori.

Le origini

I lavori di manutenzione eseguiti su questi manufatti nel corso degli anni hanno previsto stuccature mimeticamente accordate all'originale rendendo ancor più difficile il riconoscimento dei materiali utilizzati. Lo studio dei materiali utilizzati nell'architettura moderna (così come l'architettura antica) ha il compito di consentire un restauro mirato e filologicamente corretto e la trasmissione al futuro degli stessi in quanto si prestano ad essere importanti documenti di tecniche artigianali ormai perdute (9, 10).

Diventa quindi indispensabile anche la formazione di artigiani in grado di riprodurre le metodologie tradizionali affinché gli interventi di restauro o recupero possano essere maggiormente filologici. Il recupero degli edifici moderni è legato inoltre anche a questioni di carattere culturale, come la riscoperta di metodologie costruttive tipiche dei singoli luoghi. La difficoltà di reperire maestranze specializzate nella conservazione del patrimonio storico – artistico ha fatto sì che il Consiglio d'Europa nel 1986 emanasse una "Raccomandazione relativa alla promozione dei mestieri artigiani legati alla conservazione del patrimonio architettonico" con l'intento di sollecitare specifiche iniziative finalizzate a tramandare quei mestieri di interesse storico-artistico che rischiano di scomparire (10-13).

*Importanza
dell'artigia-
nato locale*

Il restauro e la conservazione del patrimonio architettonico *Art Nouveau* devono affrontare, oltre al problema della scarsità di manodopera specializzata, anche i problemi legati all'inquinamento. L'ambiente urbano inquinato favorisce un forte degrado dei materiali da costruzione ed i lavori di manutenzione vengono oggi eseguiti

con scarso interesse nei confronti delle caratteristiche dei materiali in relazione alle avversità dell'ambiente (12). Sfortunatamente i materiali utilizzati nell'architettura *Art Nouveau* e più in generale del movimento moderno, come le pietre artificiali, sono scarsamente studiati dal punto di vista microstrutturale e quindi in letteratura sono disponibili solo pochi dati sperimentali sulla loro composizione, degrado in ambienti urbani aggressivi, consolidamento, ecc. Questo è probabilmente dovuto al fatto che queste decorazioni sono tutt'oggi considerate "recenti", ed essendo realizzate in cemento sono spesso soggette ad errati interventi di manutenzione od addirittura di demolizione, contribuendo così alla perdita di un patrimonio culturale in parte dimenticato. Anche lo studio delle fonti letterarie permette di ottenere utili informazioni sulle ricette e sulle tecniche costruttive di questi decori, fornendo una conoscenza il più possibile esaustiva dei materiali edilizi utilizzati nel periodo moderno, come premessa per un futuro protocollo di restauro per la salvaguardia del patrimonio architettonico *Art Nouveau* in scala europea. Lo stesso approccio olistico sottolineato per le architetture antiche può essere quindi utilizzato anche per le architetture del movimento moderno e per i relativi materiali (11, 13).

Nuovi materiali

La ricchezza decorativa dell'architettura Liberty ed *Art Nouveau* fu possibile grazie all'accostamento innovativo di materiali nuovi (acciaio, cemento e derivati) con quelli tradizionali (laterizio, ferro, vetro) per la realizzazione degli elementi decorativi di facciata. Lo sviluppo della pietra artificiale, che si colloca nella metà del XIX secolo, è del resto legato a quello del cemento Portland. All'inizio del Novecento si affermò infatti l'uso di tale materiale in edilizia e al tempo stesso lo sviluppo dello stile *Art Nouveau* in Europa. Questa concomitanza di eventi è dovuta al fatto che l'*Art Nouveau* fu fortemente influenzata dallo sviluppo dei nuovi materiali da costruzione come l'acciaio ed il cemento e dall'evoluzione delle tecniche costruttive dei materiali tradizionali (pietre, laterizi, legname) come mostrato in Figura 13. La nascita in tutta Europa di molte riviste¹¹ nelle quali si dava ampio spazio ai manufatti realizzati secondo le istanze del Nuovo Stile, testimonia questo stretto legame tra lo sviluppo dei nuovi materiali ed i nuovi modelli estetici (14, 15).

¹¹ In Italia nel 1890 uscirono *l'Arte Utile* e *l'Arte Italiana decorativa e industriale* (1890-1914), nel 1895 *l'Edilizia Moderna*, nel 1902 *l'Arte decorativa moderna*, nel 1905 *l'Architettura italiana*; in Francia dal 1897 fu pubblicato *l'Art et Décoration*, tra il 1898 ed il 1914 *l'Art Décoratif*, tra il 1880 ed il 1902 *la Revue des Arts Décoratifs*; in Inghilterra dal 1893 *The Studio* ed *Oxford and Cambridge Magazine*; in Germania particolarmente significative furono *Decorative Kunst* (1897-1929), *Deutsche Kunst und Dekoration* (1897-1934). In Italia la rivista *Il Cemento* fondata nel 1904 rappresenta una fonte preziosa di informazioni sulla composizione e la produzione dei diversi tipi di pietra artificiale (14).

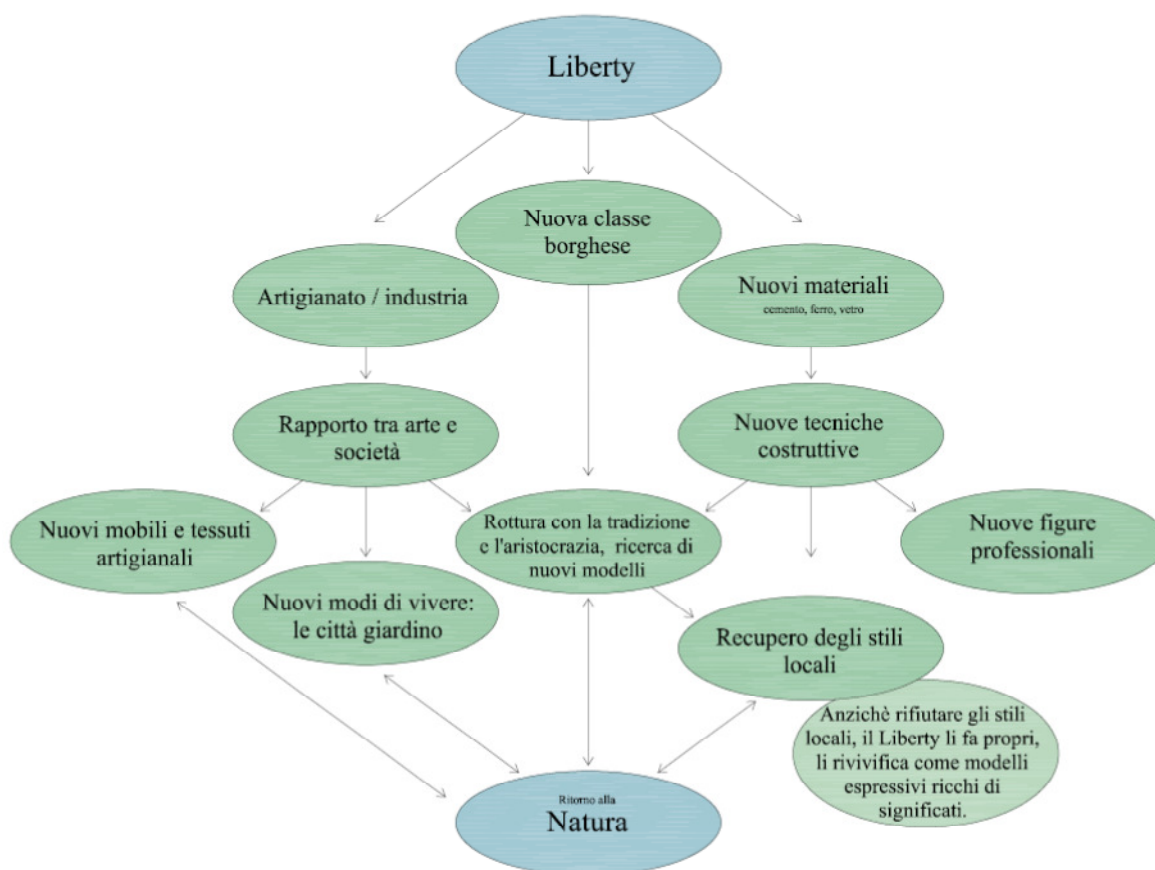


Figura 13 Schema delle diverse tematiche alla base del Liberty.

Il primo a parlare di *pierre reconstitué* a proposito di un materiale ottenuto da una miscela di pietra tenera frantumata e calce idraulica costipata in stampi, fu il francese M. Bailly nel 1875 all'Associazione francese per lo sviluppo delle scienze¹². In Italia le prime pietre artificiali furono esposte al pubblico all'Esposizione Industriale del 1881 a Milano¹³, mentre tra le prime applicazioni ci furono alcuni edifici torinesi, tra cui:

Prime applicazioni

- il Tempio Valdese, in Corso Vittorio Emanuele II 23 a Torino, dell'arch. Luigi Formento (1851-1854). In tale edificio si decise di sostituire le decorazioni in cotto

¹² Il brevetto è stato presentato dal francese M. Bailly con il nome di *Pierres factices*, cioè appunto pietre artificiali, all'*Association française pour l'avancement des sciences*, a Nantes nel 1875 e pubblicato in *Magazin des art set de l'industrie*, n.8, Agosto, 1876 (16).

¹³ Nel visitare l'Esposizione industriale del 1881 a Milano, Archimede Sacchi riportò che: «Il cemento è un materiale edilizio che adesso assomiglia ad un generico, ossia a quell'attore che fa tutte le parti e pare voglia arrogarsi ancor di più, cioè, la facoltà di diventare il materiale universale del costruttore. Che sia in voga, si vede». Osserva «pietre fattizie, piccole o smisurate, squadrate o tonde che paiono pietre naturali, arenarie o brecce, e che riescono forti quanto e anche più di queste»; piastrelle policrome, coperture di tetti o terrazzi, condotte, ponti, acquedotti, colonne, mensoloni, capitelli, cornicioni e lavori d'ogni genere di ornato. Al tempo stesso però notò che «il cemento è poco trattabile per una finitura artistica soddisfacente» (17).

(previsti nel progetto iniziale) con elementi in cemento perché più duraturo e più facile da rifinire;

- l'edificio all'angolo tra via Garibaldi e piazza Statuto a Torino progettato dall'arch. Giuseppe Bollati, con gli elementi in pietra artificiale dei balconcini assemblati come quelli in pietra naturale;

- le costruzioni del Borgo Medioevale al Valentino per l'Esposizione Generale Italiana tenutasi a Torino nel 1884¹⁴ (18).

Lo sviluppo dei manufatti in cemento a Torino già a partire dalla fine del XIX secolo è testimoniato anche dalla nascita di diversi laboratori artigiani. Tra questi, quello del prof. Pietro Quadri fu il più importante in quanto vennero realizzate la gran parte delle decorazioni torinesi ¹⁵ (16).

*Critiche
ed
adesioni*

Lo sviluppo della pietra artificiale fu però criticato e la sua accettazione per fini artistici fu lunga e difficoltosa¹⁶. Contro l'uso mimetico della pietra artificiale si scagliarono i paladini della sincerità architettonica che ritenevano sacrilega l'imitazione di un materiale nobile da parte di uno più vile¹⁷. La massa fluida delle malte cementizie

¹⁴ L'arch. C. Gelati per la realizzazione delle pietre artificiali ricordava che non ci si accorgesse del fatto che si trattasse di un materiale artificiale tanto era perfetta la somiglianza con la vera pietra da taglio, annotando proprio che lo scopo dei manufatti fosse la riproduzione di fabbriche con i loro svariati elementi di pietra e di cotto (18).

¹⁵ Per rispondere alla sempre crescente richiesta di produzione di decori cementizi nacquero anche altri laboratori come quello di A. Margaritora; quello di G. B. Luisoni, titolare della "Luisoni, successor loro & Piattini", passato di proprietà alla ditta "Gastaldo stuccatori dei F.lli Pisano"; i laboratori di Angelo Reycond, G. Belli e C. Florio (16, 19). Inoltre vennero istituiti alcuni corsi professionali presso la Regia Accademia Albertina, le Scuole Tecniche Operaie San Carlo di Torino (1848) attraverso corsi di disegno, modellazione, ecc. (16).

¹⁶ Come testimonia l'articolo comparso sulla rivista "Il cemento" nel 1908: «L'introduzione della pietra artificiale cementizia nella costruzione incontrò molta difficoltà sul principio a giorno – sebbene ammessa quasi universalmente per le sue proprietà resistenti – non è accettata con eguale favore da molti per le applicazioni estetiche e decorative. Ciò è dovuto ad alcuni insuccessi delle prime opere che erano state eseguite con molte speranze e con grande convinzione, ma senza una conoscenza adeguata dei mezzi di fabbricazione. [...] Del resto neppure in questo caso tutto il male venne per nuocere e quelli che giustamente serbavano fiducia nella nuova applicazione si posero con impegno all'opera per togliere di mezzo i difetti che non erano essenziali nel prodotto, ma dovuti a cause accidentali e a vizio di fabbricazione. I primi risultati ottenuti dall'esperienza furono confortanti. [...] Bisogna in tal modo sradicare vecchi pregiudizi, scuotere antiche consuetudini, instillare fiducia negli architetti perché il mezzo che loro si offre facile ed economico, sia accolto con quella sicurezza profonda dell'esito senza di cui il costruttore non può procedere nelle sue opere» (20).

¹⁷ Lo stesso Lavini sul numero 3 de "L'architettura italiana" del 1912 esprime un giudizio categorico: «Il cemento armato è apparso pochi anni addietro all'orizzonte architettonico come un obbrobrio! Rappresentava l'invasione dell'Industria sull'Arte: era il materiale ignobile che veniva a simulare il materiale naturale facendogli tuttavia adempiere a funzioni inverosimilmente audaci, temerarie, inquietanti; era la costruzione rigida e monolitica misteriosamente disciplinata nel suo brutale ardimento dalla formula scientifica. La stessa prevenzione e lo stesso disdegno aveva salutato l'avvento del ferro

permetteva però agli architetti di proporre nuove forme di espressione con fregi floreali, putti, nastri ed animali tratti da un repertorio del tutto rinnovato e che ben presto invase le facciate delle residenze borghesi. Nelle figure 14-23 vengono proposti alcuni esempi di decori floreali tratti dal contesto locale emiliano. Alcuni di questi edifici sono stati realizzati da **Ciro Contini**¹⁸, **Paolo Sironi**¹⁹ e **Mario Stocchi-Monti**²⁰. Nelle figure 24-34 si riportano alcuni edifici romagnoli e marchigiani, a dimostrazione di come la pietra artificiale avesse avuto un'importante diffusione anche nelle città di provincia grazie alla crescita della classe borghese, tra i quali il celebre villino **Ruggeri**²¹ a Pesaro di

nella architettura e la sua rapida diffusione. [...] Dopo l'introduzione su vasta scala della malta di cemento abbiamo veduto modellarsi le facciate talvolta fino alla convulsione ed all'assurdo, abbiamo veduto la decorazione plasmarsi e cercare di apparire immedesimata col muro e col sostegno; ma si sente generalmente il carattere appiccicaticcio e mendace di questo rivestimento, la mancanza di omogeneità colla massa costruttiva, l'assenza di valore organico» (21).

Anche U. Monneret de Villard ne il "Monitore tecnico" del 1908 è sulla stessa posizione: «Molte volte l'architetto ricorre persino al procedimento di nascondere l'intrinseca maniera della sua costruzione: a questa categoria di maschere architettoniche appartengono gli intonaci, gli stucchi, i rivestimenti, le incrostazioni. Non occupiamoci del caso patologico, quando cioè un architetto simula con materiale vile il materiale prezioso, col cemento la pietra, con lo stucco il marmo, colle vernici le incrostazioni di pietre rare: questa è una menzogna, una volgare e triviale menzogna, che merita rimproveri anche più acerbi di quelli infertigli dal più vigoroso paladino della sincerità artistica, John Ruskin» (22).

¹⁸ **Ciro Contini** (Ferrara, 1873 – Los Angeles, 1952). Non si sa molto della vita di Contini, le sue uniche opere ancora esistenti si trovano a Ferrara e sono tre villini su viale Cavour e due tombe, l'una al cimitero ebraico e l'altra alla Certosa. Con l'arrivo delle leggi razziali si trasferì a Los Angeles dove costruì ville per le celebrità del cinema (23).

¹⁹ **Abramo Ariodante Sironi** (Milano, 1858 – Riccione, 1927). Sironi, detto Paolo, nacque a Milano nel 1858 dove cominciò a lavorare sin da giovane presso il laboratorio del padre. Dopo il diploma all'Accademia di Belle Arti di Brera, Sironi soggiornò a Parigi dove svolse un periodo di apprendistato. In Lombardia progettò una serie di edifici a Milano, a Varese ed alcuni villini sul lago di Como, in stile neo-moresco. Sempre a questo periodo risalgono numerose onorificenze. Sironi arrivò a Bologna nel 1898 e fondò con il figlio Alberto l'impresa di costruzioni Edilizia Moderna per la costruzione di una serie di villini vicino a porta Saragozza, diventando così uno degli imprenditori – progettisti di spicco della città. Sironi si occupò dal 1902 al 1906 anche della lottizzazione della zona compresa tra la circonvallazione Mazzini – S. Stefano. Fuori Bologna Sironi ebbe molte commesse, tra le più importanti la costruzione del villino del conte Pietro Conti a Porto Civitanova nelle Marche (1907-1910). Dopo la morte dei due figli maschi, Sironi si ritirò dalla professione trasferendosi a Riccione dove morì nel 1927 (24).

²⁰ **Mario Stocchi-Monti** (Parma, 1880-1950). Diplomato all'Istituto Tecnico di Parma (1898) esercitò la libera professione. La sua attività di costruttore è limitata alla progettazione di piccoli edifici residenziali costruiti lungo i viali interni e periferici delle città. Le sue case, di chiara impronta Liberty, sottolineano una netta rottura con la tradizione eclettica locale, come Ghirardi-Pomarelli ed il villino Bonazzi (1911) (25).

²¹ **Oreste Ruggeri** era un veterinario-industriale di singolare versatilità, creatore dei «glomeruli» a base di solfato di ferro contro l'anemia, ma anche fondatore di una fabbrica di ceramiche Liberty che contribuì a diffondere a Pesaro lo stile Liberty. Ruggeri, decise di costruire il proprio villino nel 1902. L'edificio, che copre una superficie di appena 90 m² ed ha un'altezza non superiore ai 15 metri, sorge in un giardino recintato a forma di pentagono. La splendida cancellata che lo completava, opera del pesarese Ferdinando Bardeggia, è andata distrutta nel 1936. Anche la serra, il grande sedile piastrellato ed il gazebo sono scomparsi a causa della guerra: soltanto la grande fontana circolare, decorata da grosse aragoste, è rimasta

Giuseppe Brega²² (24). Per costruire il proprio villino, Ruggeri portò a Pesaro nel 1902 il cemento. Alcuni testimoni del passato riferirono di quanto gli operai fossero perplessi e scettici di fronte ai sacchi di cemento che stavano scaricando da un vagone alla stazione ferroviaria di Pesaro. Le decorazioni esterne dell'edificio, che per le parti maggiormente aggettanti come certe ninfee della facciata orientale hanno un supporto interno in ferro, pare fossero state plasmate da maestranze austriache con un cemento alluminoso molto compatto capace di resistere alla particolare aggressività degli agenti atmosferici dato che il villino si trova quasi affacciato sul mare. L'effettivo utilizzo del cemento armato nella decorazione non fu accertato nemmeno durante i restauri del 1963. Si è più volte affermato (anche in diversi testi sul Liberty italiano) che la facciata est fosse realizzata con decorazioni in gesso, ma se così fosse oggi dovrebbero risultare almeno in parte degradate dalla pioggia e dall'ambiente marino. Dopo oltre cent'anni invece tali decori sono in ottimo stato di conservazione. Anche il muretto di recinzione, decorato a bassorilievo con foglie di platano, è realizzato in cemento come i gradini della scala d'accesso realizzati in graniglia bianca. Proprio grazie al cemento, usato per la sua plasticità e fluidità, sono stati creati qui alcuni degli arabeschi più incredibili della stagione Liberty (27). Tuttavia di fronte ad esempi così esuberanti, sia molti accademici che alcuni critici modernisti furono contrari al nuovo stile, in quanto scettici di fronte all'esuberanza posticcia di alcune facciate, troppo pesantemente decorate per rivelare la naturalezza del progetto²³.

intatta. Ruggeri può anche essere considerato il coautore del suo villino, che si ispira al verismo dell'*Art Nouveau* parigino (26).

²² Giuseppe Brega (Urbino, 1877 – Pesaro, 1929). Legò principalmente il suo nome alla costruzione del villino Ruggeri a Pesaro e della villa Pernigotti, entrambe caratterizzate da fastosi decori tratti dal mondo vegetale ed animale. In merito alla costruzione del villino Ruggeri il pittore pesarese Sandro Gallucci narrò di un colloquio con lo stesso Brega in cui dopo essersi rallegrato con lui per la realizzazione del villino, Brega rispose: «Non è stata colpa mia. Oreste [Ruggeri], che si era entusiasmato all'Esposizione Universale per la nuova arte, mi portò da Parigi i disegni di un architetto francese per costruire il villino». Tale testimonianza assieme al fatto che sulla porta sia riportata la scritta «Concezione di Oreste Ruggeri – proprietario e di Giuseppe Brega – esecutore – urbinati 1902-1907» lascia supporre che il villino sia frutto di una collaborazione tra committente ed architetto (27).

²³ Il Melani, che mentre riconosceva il cemento armato come alleato ed amico, considerava il cemento artistico come una sventura, in quanto con le sue comodità e i suoi prezzi inferiori alla pietra “intralcia il nostro movimento liberale per la sua ampollosità”. Il cemento decorativo inganna l'architetto, che “incurante della rispondenza che deve correre tra le linee di un ornato e la resistenza del materiale cagiona il tumulto contro la sobrietà e l'armonia”. Meglio quindi considerarlo una “sincera imitazione” piuttosto che pretendere quelle stravaganze non confacentesi alle qualità della pietra (17).



Figura 14 Villino Melchiori, viale Cavour 184, Ferrara, Ciro Contini, 1904.



Figura 15 Particolare del pilastro del cancello del villino Melchiori, viale Cavour 184, Ferrara, Ciro Contini, 1904.



Figura 16 Particolare del balcone che riprende il decoro del cancello del villino Melchiori, viale Cavour 184, Ferrara, Ciro Contini, 1904.



Figura 17 Particolare della finestra del villino Melchiori, viale Cavour 184, Ferrara, Ciro Contini, 1904.



Figura 18 Villino in via Audinot 9, Bologna, Paolo Sironi, 1905.



Figura 19 Particolare dei decori floreali nel villino in via Audinot 9, Bologna, Paolo Sironi, 1905.



Figura 20 Villino Bonazzi, viale Rustici 8 angolo viale Magenta, Parma, Mario Stocchi Monti, 1911.



Figura 21 Particolare del balcone. Villino Bonazzi, viale Rustici 8 angolo viale Magenta, Parma, Mario Stocchi Monti, 1911.



Figura 22 Rocchetta Mattei, Riola, Bologna, 1850-1859.



Figura 23 Finto albero in pietra artificiale (*rocaille*), Rocchetta Mattei, Riola, Bologna, 1850-1859.



Figura 24 Villa Adelia già villa Dorina, via Dati 14, Viserba di Rimini, 1



Figura 25 Particolare del balcone e delle finestre di villa Adelia già villa Dorina, via Dati 14, Viserba di Rimini, 1905.



Figura 26 Villino via Bertoldi da Serravalle 19, Fano.



Figura 27 Particolare del decoro sopra la finestra del villino via Bertoldi da Serravalle 19, Fano.



Figura 28 Particolare del decoro sopra la finestra binata del villino via Bertoldi da Serravalle 19, Fano.



Figura 29 Ex Cooperativa di consumo, strada Adriatica 15-17-19, Pesaro.



Figura 30 Villino Ruggeri, piazzale della Libertà, Pesaro, Giuseppe Brega, 1902-1907.



Figura 31 Villino Ruggeri, prospetto sul lungomare, piazzale della Libertà, Pesaro, Giuseppe Brega, 1902-1907.



Figura 32 Particolare dei decori del sottogronda nel prospetto sul lungomare del villino Ruggeri, piazzale della Libertà, Pesaro, Giuseppe Brega, 1902-1907.



Figura 33 Particolare del *bow-window* nel prospetto sul piazzale della Libertà del villino Ruggeri, piazzale della Libertà, Pesaro, Giuseppe Brega, 1902-1907.



Figura 34 Particolare del *bow-window* nel prospetto all'angolo di viale Trieste del villino Ruggeri, piazzale della Libertà, Pesaro, Giuseppe Brega, 1902-1907.

Per analizzare meglio lo sviluppo della pietra artificiale in confronto con il contesto italiano ed europeo in rapporto allo sviluppo delle tecnologie e alla cultura accademica, sono state graficate in maniera cronologica le principali date che riguardano tali tematiche (Figura 35). Da tale schema si nota come in Italia in Liberty sia un'esperienza limitata ad un arco temporale molto breve (per lo più tra il 1902 ed il 1915) e come la pietra artificiale sia stata introdotta in Italia con un certo ritardo rispetto al resto d'Europa, anche a causa di una critica sulle riviste di settore che ne ha ostacolato la diffusione. L'uso del cemento trovò maggiore riscontro nella costruzione di ponti ed opere civili anche grazie al lavoro svolto dall'ing. Porcheddu²⁴ che per primo in Italia ottenne la licenza del sistema Hennebique (vedi anche nota 78).

Contesto europeo

²⁴ Giovanni Porcheddu (Ittiri - Sassari, 1860 – Torino, 1937) Di umili origini e cresciuto per lo più dai parenti più stretti (i genitori morirono prematuramente) si laureò ingegnere civile ed industriale a Torino nel 1890. Nel 1896 diffonde il brevetto del Sistema Hennebique in Italia dopo esserne diventato concessionario per l'Alta Italia. Nel 1914 la rete ufficiale Hennebique ha come concessionario per l'Italia il solo Porcheddu con le quattro sedi di Torino (principale), Genova, Milano e Roma. Realizzò alcune opere che hanno raggiunsero il primato nel mondo come i silos Granari del porto di Genova (1898-1901) ed il ponte Risorgimento a Roma (1910-1911), il campanile di S.Marco a Venezia (1910-1911) e lo

Il contesto italiano risulta su posizioni più conservative rispetto al resto d'Europa e agli Stati Uniti d'America, ma anche all'estero l'introduzione della pietra artificiale non fu semplice ed immediata, come dimostrano alcuni articoli apparsi sulle riviste internazionali²⁵ (17).

Anche in Polonia il cemento fu utilizzato per la realizzazione di decori per le facciate. Lo sviluppo del cemento in Polonia e la presenza di importanti stabilimenti (come quello di Grodziec vicino Będzin) nella zona della Silesia influirono certamente sullo sviluppo della pietra artificiale nella produzione dei decori *Art Nouveau*. Tali elementi venivano creati in serie presso laboratori artigiani e successivamente posati sia in facciate intonacate che in faccia a vista, di solito con l'intento di ottenere un colore simile oppure in contrasto con la decorazione e lo sfondo sottostante. I decori venivano inoltre colorati anche se l'intento non era solo quello di imitare le corrispondenti pietre naturali come in Italia. La selezione dei materiali era fatta anche in base alla classe sociale del committente: i materiali tradizionali venivano preferiti dai nobili e dagli ecclesiastici poiché rispecchiavano l'ideale della *firmitas* tipica della loro posizione economica e sociale, invece i materiali nuovi, come il cemento, erano preferiti dalla nascente borghesia più pragmatica e mentalmente più aperta alle nuove sperimentazioni ed interessata ad una riduzione dei costi (13).

In Portogallo, al contrario dell'Italia e della Polonia lo sviluppo delle pietre artificiali (e quindi del cemento) risultò più lento in quanto i materiali tradizionali (come le pietre intagliate a mano, l'intonaco di gesso rinforzato con fibre vegetali, etc.) erano ancora molto utilizzati. Il cemento veniva utilizzato per lo più nelle fondazioni per la realizzazione di travi, mentre le strutture di elevazione venivano costruite in legno (secondo la tecnica tradizionale del *tabique*, un muro portante di legno rivestito di sottili strati di intonaco), pietre, mattoni di *adobe* (una semplice miscela umida di argilla e fieno) e mattoni cotti di argilla (13).

Stabilimento Fiat Lingotto a Torino (1916-1926). Tra i tanti riconoscimenti, il diploma di Cavaliere al Merito del Lavoro nel 1914 (28).

²⁵ Si riporta di seguito una parte dell'articolo "*Artificial Stone*" comparso su "*The American Architect*" nel 1904. «I nostri architetti, comunque, non furono così pronti ad ammettere la sua utilità come sostituto della pietra naturale. La ragione non è difficile da trovare. Sono poche le maestranze specializzate che conoscono da una vita il cemento Portland e le sue caratteristiche. Inoltre vi è una scarsa conoscenza nei trattamenti e nelle tecniche di applicazione del cemento, e sebbene gli scarsi risultati risultavano spesso frutto di un occhio non curante, non è spesso questa la causa del fallimento. Quasi tutti i costruttori hanno tentato una volta o l'altra di creare la propria pietra artificiale, e la maggior parte di questi hanno abbandonato il tentativo disperati» (29).

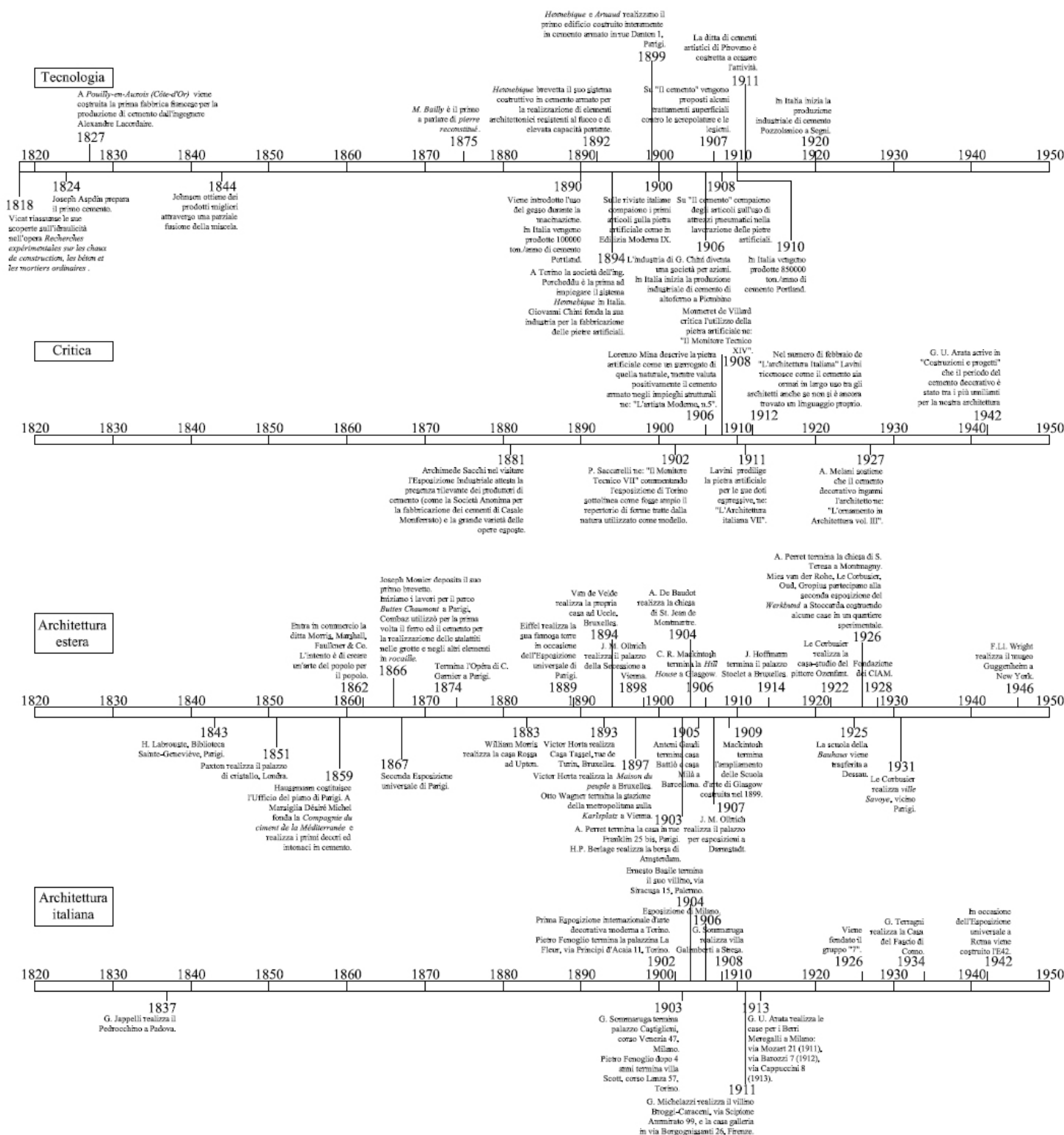


Figura 35 Confronto cronologico dello sviluppo della pietra artificiale nei diversi contesti.

*Elementi
in serie*

La pietra artificiale riusciva ad associare le istanze sociali (secondo quanto già dichiarato da Morris) riducendo i costi di produzione, con la ricerca formale ed estetica tipica dell'*Art Nouveau*, per questo era nel contempo un prodotto a metà strada tra artigianato ed industrializzazione, frutto di uno studio approfondito della forma, della tecnica realizzativa e della funzione. La pietra artificiale richiedeva infatti una lavorazione che andava seguita globalmente, più vicina all'alto artigianato che alla produzione industriale. Inoltre i componenti in pietra artificiale, potendosi riprodurre in molti esemplari assicuravano una forte riduzione dei costi, garantendosi una larga diffusione e ponendosi come antesignani degli attuali oggetti di *industrial-design*. La possibilità di riutilizzare lo stampo più volte per realizzare diversi elementi architettonici fu tra gli aspetti che contribuirono maggiormente allo sviluppo di questo materiale poiché garantiva una forte riduzione dei costi. Tra gli esempi più significativi dell'utilizzo seriale dei decori in pietra artificiale vi è il confronto tra la Casa Legnani in via Urbana 6 a Bologna e l'Hotel Helvetia in piazza Vittorio Veneto 11 a Porretta Terme. Casa Legnani, che era abitazione e laboratorio artigianale del famoso cementista bolognese, presenta gli stessi decori ai balconi e alle finestre dell'Hotel Helvetia a dimostrazione di come il Legnani avesse riutilizzato gli stampi per diversi edifici (Figura 36 - Figura 41). Nei balconi sono uguali non solo i decori del parapetto, ma anche le mensole ed i pilastrini, così come le finestre, i davanzali ed il fregio sottogronda. L'unica differenza consiste nella lunghezza dei balconi (un modulo nella casa Legnani, due moduli nell'Hotel Helvetia), ma anche in questo caso il problema poteva essere risolto con una modica spesa, dal momento che gli elementi erano componibili e assemblati direttamente in cantiere. Un altro esempio è il confronto tra il villino Pitani in via Carducci 13 ed il villino in via Audinot 9 a Bologna, i davanzali delle finestre presentano lo stesso decoro con girasole (Figura 42 e Figura 43).

Brevetti

Le riviste del tempo ed i documenti conservati presso l'Archivio Centrale dello Stato di Roma testimoniano come fossero numerosi i brevetti che cercassero di migliorare le caratteristiche prestazionali delle pietre artificiali. Nei primi brevetti si intendeva per pietra artificiale un materiale che non presentava alcun legante idraulico o cemento (14). Solo attorno al 1870 a seguito dello sviluppo del cemento Portland cominciarono in Italia le prime sperimentazioni²⁶ di tale materiale che a breve avrebbe sostituito quelli

²⁶ Il cemento in Italia tarda a svilupparsi rispetto agli altri paesi europei a causa della scarsa conoscenza delle caratteristiche peculiari del cemento ed una forte dipendenza dall'estero per gli approvvigionamenti.

tradizionali per la fabbricazione della pietra artificiale a causa della facilità d'uso, durezza e scarsa porosità.



Figura 36 Casa Legnani, via Urbana 6, Bologna, 1909.



Figura 37 Hotel Helvetia, piazza Vittorio Veneto 11, Porretta Terme.



Figura 38 Particolare del balcone, casa Legnani, via Urbana 6, Bologna, 1909.



Figura 39 Hotel Helvetia, Particolare del balcone, piazza Vittorio Veneto 11, Porretta Terme.

Risale al 1867 la prima associazione tra i produttori di calce della zona di Casale Monferrato. I membri di tale associazione sottoscrissero un accordo per evitare una reciproca concorrenza stanti le comuni zone di vendita del prodotto. Nel 1870 gli accordi furono perfezionati e si creò la Società di Casale Monferrato per la cottura della Calce Idraulica. Solo a partire dal 1876 cominciò la produzione di cemento, anno in cui Giuseppe Cerrano fece impiantare due forni verticali con annesso impianto di macinazione (30).



Figura 40 Particolare delle finestre, casa Legnani, via Urbana 6, Bologna, 1909.



Figura 41 Particolare delle finestre, Hotel Helvetia, piazza Vittorio Veneto 11, Porretta Terme.



Figura 42 Finestra del villino Pitani, via Carducci 13, Bologna, Paolo Sironi, 1906.



Figura 43 Finestra del villino in via Audinot 9, Bologna, Paolo Sironi, 1905.

L'innovazione tecnologica nel campo dell'edilizia di inizio secolo era molto rapida come si riscontra nei brevetti, sia per quanto riguarda le composizioni, sia per i procedimenti di fabbricazione e le macchine utilizzate. Nel campo degli impasti molti brevetti consistevano nello sviluppo e l'aggiornamento di invenzioni già presenti sul mercato a testimonianza della continua evoluzione. Molti esperimenti erano eseguiti da studiosi stranieri (tedeschi, francesi, inglesi, ungheresi) che presentavano i loro risultati anche in Italia per poter ampliare il loro campo di vendita (14, 31).

In questi brevetti la ricetta per le pietre artificiali era costituita da un impasto a base di cemento a cui potevano essere aggiunti additivi organici come il vischio, la destrina, le scorie d'altoforno (*machèfer*²⁷). Molti brevetti avevano per oggetto il miglioramento delle caratteristiche di comportamento del materiale, come l'impermeabilità (ottenuta aggiungendo olio di lino nell'impasto, oppure ricoprendo lo stampo con uno strato di olio siccativo) (19). La sperimentazione delle pietre artificiali risulta un momento d'importante cambiamento rispetto alla tradizione costruttiva del passato poiché si elaborano alcune nuove tecnologie che saranno poi la base per la realizzazione delle opere in conglomerato cementizio armato. A testimonianza di tale passaggio vi sono alcuni edifici per cui il calcestruzzo ha funzioni sia decorative che statiche come il ristorante Campo dei Fiori a Varese di Sommaruga. Tra i brevetti più famosi che riguardano il calcestruzzo vi è il sistema Hennebique che porterà alla realizzazione dei primi edifici in cemento armato in tutto il mondo (16, 32, 33).

Uno dei primi utilizzi della pietra artificiale nell'edilizia è in accoppiata alla pietra naturale per la realizzazione di elementi architettonici e decorativi. L'abilità degli stuccatori era tale da consentire un accostamento mimetico tra i due materiali. Per risparmiare sui costi degli elementi in pietra naturale, spesso questi ultimi venivano utilizzati soltanto nella parte bassa degli edifici (più facilmente visibile dalla strada), mentre le pietre artificiali erano applicate nella parte alta (lesene, modanature di finestre, cornicioni). Inoltre, l'utilizzo della pietra artificiale riguardava i prospetti meno importanti come quelli sul giardino, sulla corte interna o quelli laterali. Nelle fasi di progettazione venivano curati diversi aspetti, tra i quali (34, 35):

Accostamento con la pietra naturale

- la congruenza geometrica e formale con le altre parti dell'edificio, ad esempio le decorazioni venivano modulate con il passo dei laterizi se inserite in un paramento

²⁷ Nel brevetto francese Lunven per la realizzazione di un granito artificiale si preparava una miscela composta da una parte di sabbia marina, una parte di carbone, 2 parti di cementi Portland unita ad una quantità di scorie d'altoforno, *machèfer* (19).

murario a vista e, una volta ancorate alla muratura, stuccate per permettere la perfetta integrazione;

- la congruenza tra i diversi materiali, studiata anche dal punto di vista del colore tramite l'aggiunta di pigmenti nei diversi impasti;

- le modalità di posa, ad esempio i decori di notevoli dimensioni venivano scomposti in elementi più piccoli e poi assemblati (Figura 44 - Figura 45).

Accostamento con il cemento armato

Tra le altre applicazioni della pietra artificiale c'era, in connubio con il calcestruzzo armato, la realizzazione dei *bow-window*. Per risolvere la funzione statica venivano spesso adottate strutture portanti in calcestruzzo armato che sorreggevano anche i pesanti decori in pietra artificiale. La tecnica più adottata consisteva nel realizzare delle strutture portanti orizzontali a sbalzo per ogni piano che appoggiassero sulle mura perimetrali o sui pilastri ed in continuità statica con i solai dell'edificio realizzati in calcestruzzo armato. Tali strutture potevano essere solette piene a sbalzo di spessore 18-25 cm, un semplice prolungamento dei solai oppure dei sistemi di travi a sbalzo collegate attraverso un cordolo di bordo alle travi dei solai. Altri esempi dell'utilizzo abbinato del conglomerato cementizio armato e della pietra artificiale sono casa Marangoni a Torino (1903-1904, progettata dall'ing. D. Donghi) e casa Lancia a Milano (via Bocchetto 8, progettata dall'arch. Achille Manfredini, 1905) (34, 37).

Imprese

Gli elementi in pietra artificiale erano realizzati per lo più da un paio di grosse imprese specializzate in grado di restare sempre all'avanguardia e di assorbire un numero elevato di commissioni, tra queste ditte la più affermata era certamente quella di Giovanni Chini²⁸ (di cui si ripropongono alcuni dei suoi più importanti lavori in Figura 46 - Figura 48). Oltre a queste grandi imprese esisteva anche un vasto gruppo di

²⁸ La ditta di Giovanni Chini nacque a Milano alla fine del 1800. Dopo l'apprendistato come scalpellino nelle cave di Saltrio e Viggiù, Giovanni Chini a quindici anni si trasferisce a Milano, dove frequenta i corsi serali dell'Accademia di Brera e la Scuola Superiore d'Arte Applicata. A soli ventitre anni fonda la sua ditta di pietre artificiali e ben presto, con l'ampliamento del settore del cemento armato, fu in grado di aprire filiali a Genova, Lugano, ed infine a Reggio Calabria (dopo il terremoto del 1908). Nel 1906 l'impresa diventa una società per azioni, la Società Italiana Chini per l'industria del cemento, gesso e stucco. Consegue il Gran premio di arte decorativa all'Esposizione di Roma nel 1900 e a Genova nel 1901. Nel 1920 avrà eseguito a Milano le decorazioni per circa duecento edifici residenziali, tra cui: i palazzi Berri Meregalli di Arata, palazzo Vanoni di Menni, casa Lancia di Manfredini, casa Galimberti di Bossi; le ville Hoepli e Breda di Formenti; la Banca d'Italia e la Borsa di Broggi; la chiesa del Sacro Cuore di Nava; il celebre Acquario di Locati. Con il declino delle decorazioni in cemento la ditta si convertì alle strutture in cemento armato per scopi ingegneristico-costruttivi, garantendo così alla sua società una vita più lunga fino alla seconda guerra mondiale. (17, 38, 39).

laboratori minori sparsi nel territorio²⁹ come quello di Ambrogio Pirovano fondato nel 1906 (Figura 49) (17).



Figura 44 Palazzina *La Fleur*, via Principi d'Acaja 11, Torino, Pietro Fenoglio, 1902 (36).

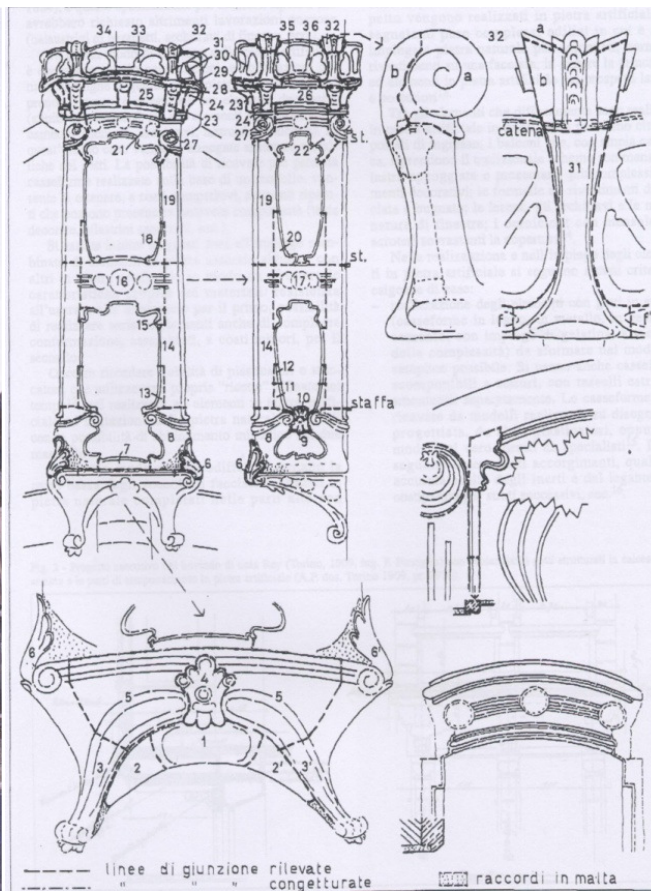


Figura 45 Esempio di bow-window con evidenziate le giunzioni tra i singoli elementi in pietra artificiale realizzati fuori opera. Palazzina *La Fleur*, via Principi d'Acaja 11, Torino, Pietro Fenoglio, 1902 (35).

Con la fine del Liberty l'interesse per la pietra artificiale si esaurisce e dopo la fine della prima guerra mondiale la produzione di manufatti in pietra artificiale venne limitata ad elementi in serie (blocchi pieni, tegole, piastrelle, cornici, colonne, ecc.) (16). La selezione degli aggregati diventò sempre meno accurata, in quanto diminuiva l'interesse per gli aspetti cromatici ed anche le superfici non venivano più lavorate ma lasciate allo stato in cui si trovavano dopo la sformatura. Questa scarsa qualità dei prodotti finali era

Declino

²⁹ Tra questi: la ditta di Ambrogio Pirovano (fondata nel 1906, tra le opere più rilevanti vi sono le decorazioni di casa Tensi in via Vivaio 4 a Milano, chiuse nel 1911), le imprese Ferrandini (che realizzarono la villa Dosso Pisani di Perrone in Brianza), le imprese Ghilardi (villa Comi di Sommaruga a Milano), Pelitti (case Bellorini di Brusconi e case Carugati di Arata), De Grandi (casa Conti di Bossi e la stazione centrale a Milano di Stacchini), la Cooperativa Stuccatori (case Bernasconi di Beltrami), ed ancora le ditte Lancina, Rampinelli, Radice, la Società Lodigiana per Lavori in Cemento, il laboratorio di Luigi e Giuliano Chiesi e la bottega Bonini e Brandaglia a Firenze (10, 17).

dovuta ad una riduzione dei costi, a favore di un miglioramento della qualità degli stampi per ottenere una maggiore serialità. Durante la Seconda guerra mondiale le tecniche di produzione andarono via via dimenticate e nel dopoguerra furono realizzati solo elementi architettonici di basso costo, senza alcun tipo di decorazione. I problemi imposti dal *boom* economico ed edilizio degli anni '60 comportarono la conseguente perdita di memoria materiale, tecnologica e professionale, ivi compreso l'oblio della pietra artificiale (14, 32).



Figura 46 Particolare del coronamento della facciata del Palazzo Berri-Meregalli, via Cappuccini 8, Milano, Giulio Ulisse Arata, 1914 (36).



Figura 47 Casa Galimberti, via Malpighi 3 Milano, Giovan Battista Bossi, 1902-1905. Decorì in ceramica, pietra artificiale e ferro battuto (40).



Figura 48 Acquario Civico, particolare con le decorazioni ceramiche, via Gadio 2, Milano, Sebastiano Locati ed Orsino Bongi, 1906 (40).



Figura 49 Palazzo Castiglioni, Corso Venezia 47-49, Milano, Giuseppe Sommaruga, 1903 (40).

1.3 Ricette storiche

Solitamente il maestro artigiano, che conosceva anche le tecniche per la lavorazione e la rifinitura della pietra naturale, metteva a punto una serie di ricette che trascriveva su di un apposito quaderno. Con tali ricette si ottenevano delle pietre artificiali che componevano il campionario di riferimento nella produzione dei manufatti da mostrare al cliente. Sfortunatamente la gran parte di queste raccolte sono attualmente scomparse a seguito della chiusura del laboratorio stesso. Solo in particolari casi è stato possibile recuperarle (come nel caso del laboratorio Luisoni). Diventa quindi importante riuscire a recuperare ciò che è rimasto di tale patrimonio in quanto testimonianza di un sapere artigiano tutt'oggi dimenticato (16).

*Imitazione
della pietra
naturale*

Le riviste dell'epoca mettevano in luce un clima di vivace sperimentazione³⁰ nella formulazione delle ricette, per lo più con lo scopo di selezionare gli aggregati ed i pigmenti per ottenere il migliore effetto mimetico (ad esempio in casa Campanini a Milano, dove i decori in pietra artificiale imitano il ceppo dell'Adda³¹, Figura 50) (42). L'utilizzo di pigmenti organici ed inorganici era spesso in combinazioni molto variabili, risulta quindi difficile ricostruire un vero e proprio ricettario codificato, visti i caratteri di artigianalità ed originalità delle ricette stesse. Il cementista si occupava quindi dell'intera produzione dell'elemento architettonico: dalla realizzazione degli stampi, alla formulazione delle miscele e alla formatura dei decori, fino a diventare il tramite tra il modellatore e lo scalpellino che eseguiva le decorazioni sul pezzo finito (43).

Le pietre artificiali venivano ottenute con diversi tipi di impasti al fine di migliorare alcune caratteristiche come la leggerezza, la durezza, l'economicità, la resistenza agli urti e alle intemperie. La leggerezza dell'elemento era ottenuta con l'introduzione

Ingredienti

³⁰ A tal proposito J. Fritsch nel suo testo “*Les pierres artificielles, Librairie générale Scientifique et industrielle* Desforges, Parigi, 1923” riporta numerosi brevetti che riguardano sia ricette per impasti di pietre artificiali che metodi di produzione per decori e materiali da costruzione, a testimonianza di come fosse forte la sperimentazione in quegli anni (41).

³¹ Per il paramento, è stato utilizzato ceppo rustico, conglomerato di ciottoli di dimensioni anche notevoli e di composizione litologica molto varia, mentre le due statue che fiancheggiano l'ingresso sono scolpite in ceppo dell'Adda, caratterizzato da presenza di inerte molto più fine, la cui quantità è inferiore a quella della matrice arenacea. Nel ceppo sia la matrice che il cemento sono di natura carbonatica. Tali decori sembra siano stati eseguiti con due diversi impasti ottenuti con cemento addizionato a graniglia e vari inerti: uno con inerte fine per la superficie esterna a vista, e un altro con inerti più grossolani (come il ghiaietto) per il nucleo interno (42).

nell'impasto di pietra pomice³² o di altre materie prime di origine vulcanica (lapilli bianchi e neri, pozzolana, ceneri di tufo) (41).



Figura 50 Particolare dell'ingresso di casa Campanini realizzato con ceppo dell'Adda con le due figure femminili che rappresentano la Pittura e la Scultura attribuite allo scultore Michele Vedani, via Bellini 11, Milano, Alfredo Campanini, 1904-1905 (40).

³² Essendo la pietra pomice è molto friabile, durante la frantumazione si ottenevano sempre una quantità di piccoli frammenti che vengono setacciati per classare i grani più piccoli. I granuli più fini venivano ulteriormente frammentati e costituivano la base della fabbricazione. Per la fabbricare dei mattoni in pietra pomice si preparava un impasto di 1 parte di calce grassa e 8-9 parti di pomice in polvere, con l'aggiunta di acqua per ottenere una malta fluida alla quale incorporare dei frammenti di pomice più grandi. L'impasto ottenuto veniva formato in stampi cosparsi di polvere di pomice, compressi e lasciati stagionare fino all'indurimento. La leggerezza di questi blocchi e la loro solidità li rendeva adatti per la costruzione di volte (41).

Col passare del tempo, la calce addizionata di pozzolana fu sostituita dal cemento Portland che tra l'altro offriva maggiori vantaggi tra i quali un indurimento più rapido ed omogeneo, maggiore durezza e possibilità di essere lavorato superficialmente³³ (14). Tra i diversi tipi di cemento quello più utilizzato era il cemento a lenta presa, poiché consentiva una manipolazione più accurata delle malte e dei conglomerati soprattutto per forme complesse. Il Portland bianco veniva utilizzato soprattutto per ottenere particolari effetti cromatici con l'aggiunta di sostanze coloranti ridotte in polvere³⁴. I decori venivano preparati con una malta composta da una parte di cemento e due di graniglia (ad esempio di marmo) con diametro massimo di 3 mm (16, 45). Nella vasta gamma di possibilità si potevano distinguere gli impasti "normali" o "magri" (con una percentuale inferiore di cemento) da quelli "grassi" che venivano utilizzati nello strato esterno, dato che la maggior quantità di cemento li rendeva più resistenti agli agenti aggressivi (32).

La pietra artificiale da rivestimento, mira ad ottenere superfici il più possibile simili a quelle della pietra naturale nelle sue diverse specie (come il finto travertino³⁵, il falso

³³ A tal proposito riporta Edmond Marcotte ne *Les pierres naturelles et artificielles* (Gauthier-Villars et C. Éditeurs, Parigi, 1928): «Il cemento pronto conviene particolarmente per la fabbricazione delle pietre artificiali. Con una quantità d'acqua che può variare attorno il 30%, si ottiene un calcestruzzo grasso, omogeneo compatto e non gelivo. Si possono impiegare, senza esporsi a ritrattazioni, dei dosaggi molto ricchi e riprodurre così, perfettamente e solidamente, le più fini modanature. I dosaggi con una ricchezza media bastano d'altronde per la fabbricazione di pietre adeguatamente impermeabili. Inoltre, se si vuole, si possono realizzare calchi artistici dei più delicati, o al contrario, fabbricare pietre da costruzione a buon mercato» (44).

³⁴ Le sue buone qualità idrauliche e di resistenza lo rendevano molto apprezzato sul mercato ma le alte temperature di cottura necessarie per la mancanza di ferro nella materia prima lo rendevano un prodotto abbastanza più costoso del normale Portland. Nel 1902 Gresley produsse un cemento romano bianco a presa rapida o rallentata e di facile lavorazione, la cui produzione non esigeva temperature elevate. La malta plastica preparata con questo cemento e sabbia nelle proporzioni 1:2 o 1:3, dopo solo due ore raggiungeva un grado sufficiente di resistenza da poter essere lavorata con lo scalpello (45).

³⁵ «Questa pietra artificiale sta incontrando il favore di molti architetti e costruttori, stante il bellissimo aspetto, imitante molto bene il vero travertino. Viene così composto: 1 parte di cemento Portland a color chiaro, 1 parte di cemento bianco scelto, 3 parti di marmo bianco polverizzato, color giallo concent. (extra-extra) quanto basta. L'impasto, piuttosto molle, viene disteso con cura su una tavola per uno spessore di 2 cm circa; su di esso si sparge irregolarmente sale comune da cucina a grana media e grossa, previa sua colorazione con lo stesso giallo extra-extra. Successivamente si termina il getto con comune calcestruzzo; dopo due o tre giorni si toglie dalla formatrice, lavorando la superficie a grande acqua onde togliere le tracce di colore e di sale. Infine si fa stagionare in ambiente piuttosto umido. Desiderando altre intonazioni cromatiche, si può immergere il sale in una soluzione colorata diversa dall'ordinaria ed anche si può non colorire affatto il sale. Variando la granulometria di quest'ultimo è possibile ottenere effetti sensibilmente diversi» (46).

Le maestranze più esperte erano solite infarinare il sale grosso con dell'ossido di ferro in modo che sciogliendosi a contatto con l'acqua di malta e successive bagnature, si creassero delle cavernosità di colore rossiccio-giallastro tipiche del vero travertino (10).

gabbro³⁶, la falsa diorite³⁷, il finto granito³⁸, finto alabastro³⁹, l'arenaria⁴⁰, la pietra artificiale per selciati⁴¹) (10, 17). Ad esempio il palazzo del museo di Zoologia in via Selmi 3 a Bologna presenta un basamento in bugnato in pietra artificiale che imita il tufo vulcanico e delle colonne con un fregio in finto travertino (Figura 51 - Figura 53).

³⁶ Il palazzo del museo di Zoologia a Bologna, realizzato dall'ing. Guido Zucchini nel 1936, comprende un basamento in bugnato in pietra artificiale ad imitazione del tufo vulcanico, colonne con fregio in finto travertino, due vasche in pietra collocate nell'atrio di ingresso in finta diorite come le lesene alle pareti ed una scalinata in finto gabbro. Il palazzo comunale di Rocca San Casciano ricostruito dall'ing. Vittorio Dotti nel 1937 è costituito da una struttura portante in cemento armato, uno zoccolo ad imitazione del ceppo gentile (pietra brecciata usata in Lombardia), davanzali e stipiti in finto travertino, un portone d'accesso in finto gabbro e colonne in finta diorite (47).

³⁷ Secondo le indagini eseguite presso la Rocca di San Casciano anche queste finte pietre erano ottenute con una malta stesa in due strati. Il primo strato aveva le stesse caratteristiche del campione in finto travertino mentre il secondo strato era composto da una breccia cementizia con frammenti a spigolo vivo di serpentinite verde bottiglia con microvene di crisotilo, minerali di bastite nera, talco, clorite e frammenti di calcare (in particolare per il falso gabbro). I frammenti di serpentinite e calcare hanno una granulometria eterogenea da 2 mm a 8-10 mm. Il rapporto legante-aggregato è di circa 1:4. La superficie dei campioni è liscia quindi probabilmente è stata levigata (47).

³⁸ «Si prepara una malta così composta; per granito rosa tipo Baveno: 10 parti di cemento Portland di color chiaro, 10 parti di cemento bianco scelto, 12 parti di granito polverizzato, 6 parti di marmo rosso polverizzato, 2 parti di mica in frammenti. Impastata con poca acqua, la malta viene distesa al fondo della formatrice per circa 2 cm di spessore; si completa il getto con malta (o con calcestruzzo) comune. Dopo 3-4 giorni, si forma e si sottopone la superficie ad uno spruzzo d'acqua relativamente energico, tale cioè da rimuovere quel po' di cemento che esiste fra i grani. In tal modo, granito e mica risaltano molto bene. Se del caso, si completa l'opera con una leggerissima martellinatura» (46).

³⁹ «Si mescola ad idrato di magnesia in polvere, un uguale volume di marmo bianchissimo polverizzato misto ad un po' di talco. Il tutto s'impasta con silicato di sodio e si getta rapidamente. Avvenuto l'indurimento (che succede dopo breve tempo) si può levigare e lucidare il pezzo» (46).

⁴⁰ Riporta *Il cemento* nel n°1 del 1908: «Si riuscì ad imitare alcune pietre naturali da illudere l'occhio più esercitato [...]. Così ad esempio riesce perfetta l'imitazione delle arenarie di vari colori» (20).

L'arenaria si poteva riprodurre con malte in tonalità chiare su cui, in fase di posa, si spargeva limatura di ferro in soluzione acquosa di solfato di ferro e cemento (31).

In una pagina di un ricettario del laboratorio G.B. Luisoni si riporta la ricetta della pietra serena: «Cemento l.p. Casale parti 3, marmo verde ALPI fino 1 parte e ½, marmo verde ALPI (o) 2 parti, marmo nero fino 1 parte e ½. colore verde erba 60g, blu oltremare 20g, nero 30g» (16).

Per quanto riguarda i rivestimenti: «Bellissime imitazioni di arenaria si ottengono adoperando polvere di pietra invece di pietrisco oppure sabbia fina mescolata col cemento bianco nelle proporzioni 1:2½. Le venature dell'arenaria si ottengono spargendo sulla superficie della segatura di ferro imbevuta di solfato di ferro e mescolata col cemento. Tali pietre si puliscono con acqua subito dopo sfornatura oppure si arrotondano con un'arenaria dopo 5-6 giorni» (48).

⁴¹ «E' possibile fabbricare una pietra artificiale molto dura, adatta per pavimentare passaggi carrai, stabilimenti, androni, ecc., utilizzando la cosiddetta lana di scorie che deriva dalla frantumazione e granulazione a caldo delle scorie degli alti forni. Sono due le composizioni consigliabili: 30 parti di lana di scorie, 10 parti di cemento Portland, 5 parti di calce spenta. Oppure: 20 parti di lana di scorie, 10 parti di silice in polvere, 5 parti di farina fossile, 15 parti di cemento d'alta qualità» (46).



Figura 51 Museo di Zoologia, via Selmi 3, Bologna, Guido Zucchini, 1936.



Figura 52 Particolare del basamento in finto tufo vulcanico del museo di Zoologia, via Selmi 3, Bologna, Guido Zucchini, 1936.

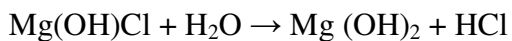


Figura 53 Particolare del basamento in finto tufo vulcanico del museo di Zoologia, via Selmi 3, Bologna, Guido Zucchini, 1936.

Un altro tipo di pietra artificiale era quella ottenuta con cemento di magnesia e calce dolomitica (carbonato di calcio combinato con silice e silicato di allumina e circa il 5% di carbonato di magnesio). Per fabbricare delle pietre artificiali con cemento di magnesia si mescolava della polvere di quarzo con magnesia calcinata (MgO) nella proporzione di 1:1 o 2:1 e silicato di potassio diluito, in modo da ottenere una poltiglia densa che poi veniva gettata nella forma. Il composto veniva infine esposto all'azione dell'anidride carbonica compressa a 1-10 atm. Dall'idrossido di magnesio (Mg(OH)_2) si formava un carbonato di magnesio (MgCO_3) che si combinava con la polvere di quarzo formando un silico-carbonato di magnesio che forniva una massa dura e resistente (49, 50). Un altro processo di produzione prevedeva che l'ossido di magnesio venisse mescolato con cloruro di magnesio (MgCl_2). Il risultato era un ossicloruro di magnesio idrato dalla formula $3\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$. Questo legante iniziava a fare presa in 40 minuti e ad indurirsi in 9 ore, inoltre aveva una resistenza a compressione compresa tra 20 e 100 MPa. Il cemento di magnesia (noto anche come cemento Sorel), era utilizzato anche per la produzione di piastrelle per interni con l'aggiunta di fibre di legno (xilolite) (51, 52, 53). Fra tutti i materiali da costruzione, il cemento di magnesia risultava però il più sensibile all'umidità, infatti l'influenza prolungata di acqua poteva togliere alla

*Cemento
di
magnesia*

pietra artificiale gran parte del cloruro di magnesio. Era sufficiente che l'aria negli ambienti nei quali si trovava applicato fosse satura di vapore acqueo, per produrre l'inumidimento ed il successivo rammollimento della massa. L'acqua portava infatti a liberare acido cloridrico (HCl), come mostra la seguente reazione:



Il secondo difetto del cemento di magnesia era la imperfetta costanza del suo volume, per via della formazione di carbonato di magnesio (50, 54). Per ridurre questi difetti furono creati diversi brevetti per ottenere un prodotto più resistente⁴². Nel Maryland (USA), grazie alla presenza di giacimenti magnesiaci, erano molto diffuse tali pietre artificiali. L'*Union Stone Company* aveva brevettato un procedimento che prevedeva una cottura a bassa temperatura per 24 ore ed una macinazione della magnesia a stato di polvere impalpabile. La magnesia veniva poi mescolata a secco con il 10% di sabbia ed una quantità sufficiente di cloruro di magnesio affinché la massa diventasse plastica. L'impasto così ottenuto veniva infine sottoposto al mescolamento, alla formatura ed al riposo per circa 1 settimana (14).

Pigmenti

Il cemento decorativo imitava la pietra in grana, tessitura e colore attraverso l'uso di particolari pigmenti. I coloranti per lo più a base minerale venivano aggiunti in piccole quantità (pochi grammi) per esaltare il colore o creare effetti cromatici. Gli additivi garantivano sia effetti estetici particolari (come il sale per imitare il travertino, anche se ciò causava la presenza di cloruri nel manufatto) che un aumento della durezza della massa indurita ed una riduzione della variazione di volume. Nella lavorazione della pietra artificiale i pigmenti macinati e setacciati ad un vaglio finissimo venivano aggiunti a secco al cemento oppure durante la fase umida dell'impasto (come avviene per il grassello in cui i colori devono essere già sciolti dentro l'acqua). Per i toni bruni rossi e gialli si poteva usare ossido di ferro e terre mentre per i blu, verdi e gialli brillanti si potevano usare cobalto e cadmio. Altri additivi coloranti potevano essere

⁴² La dolomite veniva cotta nello stesso modo con cui si calcinava la calce ordinaria, ottenendo una calce molto magra che si espandeva pochissimo anche se bagnata. In sostanza si otteneva un miscuglio di calce viva e magnesia. Una volta spenta la calce contenente anche della magnesia veniva unito il cloruro di calcio per ottenere la formazione del cloruro di magnesio ed in seguito ossicloruro di magnesio. La malta che si otteneva induriva lentamente e diventava col tempo una massa durissima, su cui l'umidità non poteva far presa in virtù dell'unione fra il carbonato di calcio e l'ossicloruro di magnesio. Questa lavorazione offriva il vantaggio di ottenere un prodotto che non era soggetto all'umidità e agli acidi presenti nell'aria ed inoltre tendeva a conservare i colori naturali delle pietre e del marmo poiché i costituenti chimici tendevano a lasciare inalterati i colori degli aggregati che venivano aggiunti dopo essere stati ridotti in polvere. Una ricetta per la realizzazione di pietre artificiali prevedeva: 100 parti di sabbia, 50 parti di pietra naturale o marmo polverizzati, 38 parti di calce spenta dolomitica, 2 parti di cloruro di calcio (55).

aggiunti all'impasto⁴³, per le tonalità del rosso, giallo, azzurro e nero, ma con scarsi risultati (10, 17).

In un primo periodo si faceva ricorso anche a sostanze coloranti di origine naturale come i decotti di foglie o di corteccia ed essenze come il mallo di noce. Il loro costo era molto basso ed erano facilmente reperibili, ma avendo una forte reattività chimica col cemento ed una scarsa resistenza alla luce solare, furono ben presto abbandonati in favore dei coloranti di origine minerale. Molto diffusi erano anche i colori all'anilina che garantivano brillantezza e vivacità, anche se reattivi con i prodotti di origine minerali (38). In ogni caso all'interno dei laboratori artigiani la miscela di pigmenti utilizzata in funzione del tipo di pietra da imitare veniva annotata nel ricettario che veniva custodito dal maestro cementista per evitare che la ricetta fosse copiata dai concorrenti (10, 17).

La granulometria degli aggregati variava a seconda dello strato, quello esterno era composto da sabbie o frammenti di pietra più fini per ottenere uno strato più compatto e resistente, mentre quello interno risultava più grossolano. Il tipo di pietra da aggiungere veniva scelto in base al tipo di pietra che si voleva imitare ed al tipo di rifinitura superficiale. Di solito si utilizzava come aggregato una polvere od una graniglia dello stesso materiale da imitare ma a volte le ricette indicavano anche miscele complesse (16). Alcuni aggregati dovevano essere evitati: i feldspati, ad esempio, davano luogo a rigonfiamenti e screpolature nello strato superficiale (57). Gli studi condotti in edifici Liberty di pregio del Piemonte e della Lombardia hanno evidenziato l'utilizzo di frammenti di marmo di Carrara, di nero di Varenna e di marmo di Botticino. Una minore cura nella scelta degli aggregati la si può riscontrare nel periodo successivo al Liberty. L'assortimento granulometrico sbilanciato (grani troppo grossi) e l'utilizzo di

Aggregati

⁴³ «Si possono anche ottenere dei gradevoli effetti introducendo delle materie estranee come mattoni rotti, vetri, frammenti di metallo, come rame, bronzo; qualche volta vengono anche usati dei chiodi di ferro, però la ruggine e le macchie producono uno sgradevole effetto. L'olio, la colla e la calce sono stati adottati alcune volte per scopi speciali. In un caso è stato adoperato il seguente miscuglio: ad ogni barile di cemento furono aggiunti 1800 g di sale, 9 kg di calce viva e spenta da una settimana, che venne passata ad un crivello fino, 1800 g di nero fumo e 450 g d'olio di lino. Nel preparare questo venne spenta prima la calce e mentre questa era ancora calda, si aggiunse il sale in soluzione assieme col nero fumo e l'olio, quindi il miscuglio venne passato attraverso un crivello fino, poi messo in botti e lasciato in riposo più di una settimana prima di usarlo. La proporzione degli altri materiali uniti al cemento fu 6:1 e la pietra d'un colore blu scuro era mista col marmo bianco [...]. Al miscuglio si possono aggiungere materie coloranti di varie specie. Quelle di origine vegetale non sono resistenti perché esse sono influenzate chimicamente dalle materie componenti il cemento. Il limite dovrebbe essere del 5% in peso del cemento, al di là di questa proporzione la diminuzione di resistenza è abbastanza grande. Il nero fumo è la materia principale per oscurire; in ragione della forte intensità e della finezza delle sue particelle produce un forte contrasto anche se in poca quantità» (56).

sabbia al posto della pietra naturale, indicano una scarsa abilità dei cementisti ed una produzione meno accurata (43).

Finti marmi

Un altro tipo di pietra naturale che si poteva imitare con il cemento è il marmo. I marmi artificiali venivano realizzati sia con gesso (solo per gli interni) che con cemento (per gli ambienti esterni). Al cemento andavano aggiunti i pigmenti (ossidi o terre) in quantità variabile a seconda dell'intensità del colore che si voleva ottenere ed aggregati di colore simile. Se il marmo che si voleva imitare era composto da macchie di diverso colore si preparava per ogni tinta un impasto, che veniva steso con la cazzuola (1-2 cm), poi con un coltello si tagliava l'impasto in tanti cubetti che venivano mescolati in base al risultato finale. Dopo aver disposto i cubetti, questi venivano nuovamente spolverati e compressi con la cazzuola (spessore di 5-6 mm). Sopra la scalfitura eseguita sul retro con un piccolo scopettino veniva collocato un leggero strato di boiaccia di cemento per facilitare l'adesione tra le due parti. Per l'imitazione delle venature si preparavano invece strati di diversi impasti che venivano sovrapposti gli uni sugli altri. Il pacchetto multistrato ottenuto veniva tagliato "a fette" dello spessore di circa 5-6 mm, che venivano poi stese sul piano da lavoro e deformate con le mani, al fine di imitare le tipiche venature del marmo. Arrotolando i vari strati si potevano ottenere anche venature a spirale. Per imitare il travertino si creavano 3 impasti di colore giallo, ma con diverse tonalità, ed all'interno veniva aggiunto sale da cucina per ottenere le tipiche fessurazioni del travertino. Dopo l'indurimento il marmo artificiale veniva sottoposto ai trattamenti superficiali di levigatura e lucidatura (58).

Brevetti

Diverse sono le ricette curiose brevettate all'inizio del Novecento: l'ungherese Gustavo Vögler preparò una pietra artificiale particolarmente leggera e resistente agli agenti atmosferici. La miscela era composta dal 40% di cemento, 5% di sabbia ed il 55% di setole di porco (aggiunte per avere aumentare la resistenza a trazione). A tale massa veniva aggiunta l'acqua (corrispondente al 20%) e successivamente il composto veniva messo in forma per la fabbricazione di diversi oggetti come le decorazioni architettoniche e le vasche da bagno che erano rafforzate da un'anima in fil di ferro (14, 59). La sperimentazione nel campo delle aggiunte riguardava anche gli aggregati di provenienza industriale (come mattoni, vetro, chiodi, frammenti di metallo, rame, bronzo, etc.) in quanto garantivano un basso costo senza avere i difetti di stabilità tipici delle aggiunte organiche (38). Nel 1900 l'italiano Giuseppe Martinetti inventò un sistema che permetteva di aggiungere al cemento le scorie prodotte dalla combustione del carbon fossile e nella fusione dei metalli come la ghisa e l'acciaio, al fine di ottenere

elementi architettonici in cui si potessero eseguire alcuni trattamenti superficiali come nelle pietre naturali (14). Nel 1906 Luca Guarinesi di Milano brevettò una tecnica in cui la pietra artificiale era composta da due strati collegati da una rete metallica malleabile: quello esterno di cemento, graniglia di marmo e acqua, mentre quello interno di cemento e sabbia crivellata. Il pezzo ottenuto risultava così economico, di facile maneggevolezza, trasporto e lavorabilità superficiale (14).

1.4 Stampi e lavorazioni

Costruzione dello stampo

La prima fase consisteva nella realizzazione dello stampo, ottenuto in negativo⁴⁴ a partire da un modello al vero (in argilla o gesso). Il modello veniva rivestito di sostanze distaccanti per favorire il distacco dello stampo⁴⁵ (31).

Gli stampi in colla (per dettagli più complessi) avevano una apposita struttura che li conteneva chiamata “madreforma”, composta da una scatola di gesso impastato con trucioli o paglia per consentire un corretto alloggiamento del materiale in via di indurimento. La madreforma veniva realizzata rivestendo il modello con uno stampo di argilla che occupava il posto della forma definitiva e con uno strato di gesso irrigidito con trucioli, paglia o tela che costituiva l’involucro esterno. Dopo l’indurimento di tale strato la scatola veniva ripulita e veniva rimossa l’argilla in modo che madreforma e modello si potessero sovrapporre dopo essere stati spalmati con olio od altre sostanze grasse (16).

Gli stampi utilizzati nella realizzazione delle pietre artificiali erano in legno, vetro, rame (o metallo, Figura 54) e gesso (Figura 55). Il vetro garantiva la regolarità delle superfici, ma le geometrie che si potevano ottenere erano molto semplici. Il legno invece, essendo igroscopico, assorbiva acqua dall’impasto creando variazioni dimensionali e fessurazioni nel pezzo finale. Per evitare questi inconvenienti veniva eseguita una impregnazione con paraffina liquida e petrolio per ridurre i fenomeni di assorbimento ed

⁴⁴ Riporta *The American Architect*: «Il consueto processo, comunque, consiste nel preparare un modello dell’ornamento in argilla, gesso, legno od un altro conveniente mezzo, e da questo modello ottenere tante sezioni quante ne sono necessarie. Quando il gesso è completamente indurito è rimosso dal modello e l’interno ricoperto con gommalacca in scaglie o altro composto non poroso per impedire ad ogni forma di umidità di penetrare nel gesso attraverso il getto di pietra artificiale. Prima che il calcestruzzo sia gettato nello stampo quest’ultimo è ricoperto con olio o con una mistura di argilla e acqua per impedire che il calcestruzzo si attacchi allo stampo e trascini con se dei frammenti quando lo stampo viene rimosso. Questa precauzione è inoltre necessaria nel caso di stampi in legno o ferro. Deve essere ripetuta ogni volta che il getto è prelevato dallo stampo per assicurare un lavoro pulito e spigoli netti» (29).

⁴⁵ «I modelli di gesso ricoperti di colore ad olio o altrimenti colorati, non si trattano con l’olio, sapone o lacca, ma si ricoprono con carta-velina umida, che si distende col pennello finché aderisca bene dappertutto. Con modelli di argilla, devesi pure fare differenza da modello asciutto a modello fresco. Dal modello di argilla fresca si trae ordinariamente la forma in gesso rinunziando al modello stesso e pertanto non è mestieri qui di trattamento preventivo; altrimenti lo si spalmerebbe con soluzione di lacca o di sapone veneziano e poi, in entrambi i casi, con poco olio di lino. Se la forma si trae in argilla, per contro il modello di argilla fresca va in ogni caso prima spalmato di lacca. [...] Modelli di cera vengono leggermente laccati e la forma allestita in gesso. [...] Se l’opera è in marmo, si dà la spalmatura di sapone veneziano e poi debolmente di olio. [La] forma [è] in gesso. Intagli in legno vengono, se possibile, inumiditi ma molto debolmente e si spolverano poi con lycopodio o talco, per trarne poi la forma. Infine può aversi un modello in metallo. Si tratta come quello di marmo. Oggetti con buona doratura o di metalli difficilmente ossidabili (argento, nichel) e che non hanno una patina di ossido da mantenere, si possono ricoprire con olio di lino» (60).

un ulteriore trattamento con petrolio e sapone per favorire il distacco. Il rame ed il gesso consentivano la realizzazione delle forme più complesse (14, 38).



Figura 54 Negativo e positivo. Il positivo è ottenuto dall'unione di diversi negativi (61).

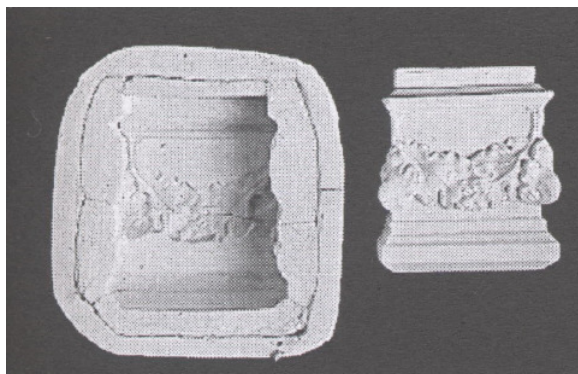


Figura 55 Stampo montato nella sua cassaforma, con a fianco una copia di capitello realizzato in questo caso con gesso di scagliola (10).

Gli stampi più usati erano quelli in gesso, gelatina⁴⁶, colla⁴⁷, cera⁴⁸ o paraffina⁴⁹ che si preparavano tramite modelli primari al positivo.

Tipi di stampo

⁴⁶ «Prescelta una gelatina [cioè una colla animale] di ottima qualità, la si pone a macerare in metà volume di acqua; si fa fondere accuratamente a bagno-maria e si lascia raffreddare non completamente. Si aggiunge poi il 10% di una soluzione di aldeide formica (al 35-40%). Il composto si può allora liberamente colare e si lascia raffreddare lentamente. Quando occorre aumentare la compattezza della gelatina, vi si incorpora dell'allume in piccola quantità, oppure una materia pulverulenta adatta; buoni risultati si ottengono aggiungendo segatura in soluzione molto diluita. Per evitare la frequente concentrazione della gelatina l'aggiunta di materia pulverulenta adatta è consigliabile, ma ancor meglio si procede con aggiunta del 15-20% di glicerina. Gli oggetti da ricoprire si isolano con spalmature di olio o di vaselina» (46).

⁴⁷ L'uso dello stampo di colla era preferito per particolari ad intaglio o a spigoli vivi. La colla veniva mischiata con una quantità d'acqua minima sufficiente a diluirla e a scioglierla a bassa temperatura e quindi veniva colata per uno spessore di circa 4 cm in un involucro di gesso che potesse contenere il modello da realizzare. Una volta tagliata a pezzi per staccarla dal modello, doveva essere usata per il getto prima che si asciugasse completamente spalmandola di grasso ed olio per impedire l'assorbimento dell'acqua dell'impasto e della calce del cemento (45).

⁴⁸ «Più propriamente si dovrebbe parlare di modellatura o formatura in cera, poiché gli stampi sono quasi sempre in gesso o in metallo. Questi si isolano preventivamente con acqua saponata o glicerina allungata, e, per aiutare il comportamento plastico della cera fusa, si riscaldano anche a buona temperatura. A getto avvenuto, si lascia raffreddare contemporaneamente il tutto, badando bene a che non si producano le cosiddette soffiature» (46).

⁴⁹ Per la realizzazione di oggetti semplici a base di cemento si potevano usare stampi di sabbia pura addizionata con argilla, terra grassa o paraffina. In particolare la sabbia trattata con paraffina poteva essere modellata a circa 44°C, temperatura quasi insignificante al tatto. Sotto i 32°C il materiale risultava invece completamente rigido e quindi lo si poteva usare come stampo. La possibilità di potere modellare immediatamente lo stampo in negativo senza dovere costruire un modello permetteva un notevole risparmio in termini di tempo ma si potevano ottenere solo forme semplici senza disegni particolarmente complessi (45). Gli stampi ottenuti però avevano una superficie particolarmente porosa che determinava un consistente assorbimento d'acqua da parte dello stampo (38).

Per geometrie complesse le forme potevano essere composte da diversi pezzi che venivano poi ricomposti e da diverse modalità di apertura, ad esempio: stampo in tre pezzi (per mensole di sostegno); in quattro pezzi con piatto senza l'anello di chiusura (Figura 56); in cinque pezzi (per semibalaustri appoggiati ad un acroterio, Figura 57); a libro (quattro pezzi con piatto ed anello di chiusura, Figura 58); a tasselli⁵⁰ (composto da più pezzi, a seconda della complessità della figura da realizzare, Figura 59) (63).

Il numero dei tasselli e le loro dimensioni dipendevano dalla complessità della forma. La loro scomposizione doveva prevedere inoltre la possibilità di smontare la forma senza che i tasselli si intralciassero gli uni con gli altri (per questo i tasselli venivano numerati) (16).



Figura 56 Forma di gesso in quattro pezzi più base per la realizzazione di un balaustro (63).



Figura 57 Forma di gesso in cinque pezzi per la realizzazione di un semibalaustro (63).

⁵⁰ «Poiché le varie sporgenze e rientranze del modello impedirebbero il distacco della forma, questa viene divisa in tante parti (tasselli) distribuite in modo da poterle asportare liberamente al momento della sformatura; occorrono quindi tante arginature (maglie) quanti sono i tasselli. Entro ogni arginatura si versa la poltiglia di gesso; quando questa si è un po' indurita viene tagliata con lo spago rispettivo (che preventivamente si è disposto entro ogni maglia). Tolti tutti i pezzi, si uniscono assieme mediante piccoli ganci o grappe. I pezzi, completamente essiccati, si ungono e si ricompongono nuovamente sul modello, eseguendo poi un'armatura complessiva esterna che, a guisa di cuffia, collega tutti i pezzi in un solo stampo monolitico» (46).

Dalla citazione tratta da "Lino Gaspari, *Il ricettario pratico per l'edilizia*, Edizioni Tecniche Utilitarie, Bologna, 1942" si comprende come gli stampi a tasselli siano in genere ottenuti da una forma generale che interessa soprattutto la parte frontale, mentre le parti laterali venivano eseguite in svariati piccoli pezzi perfettamente connessi tra loro che trovano posto nella forma generale. I tasselli di gesso spesso recano nei punti d'unione elementi di incastro a maschio e femmina (oppure delle grappe) in modo da non scivolare durante il getto dell'opera da eseguire, modificandone la forma e vanificando l'intero processo di formatura. I tasselli inoltre erano inseriti all'interno di una forma esterna ("cuffia") che ne bloccava ulteriormente i movimenti. Dopo il getto della forma complessa che si intende realizzare è possibile, estraendo i vari tasselli uno a uno, recuperare l'intera forma che consente anche sottosquadri totali (62).

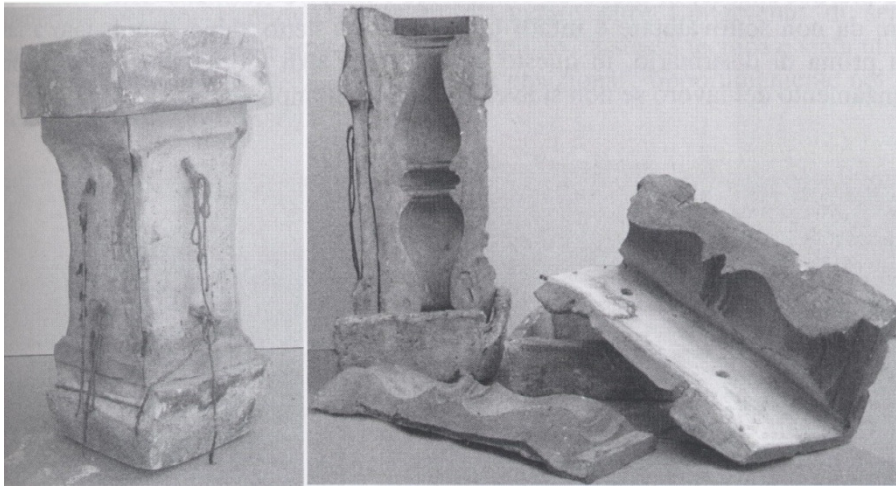


Figura 58 Forma di gesso “a libro” per la realizzazione di un balaustro. In quella chiusa si vedono i “nottolini” per assicurare la chiusura dell’elemento. Nella forma aperta si nota che nella base sono ancora incastrati in verticale due pezzi analoghi a quelli smontati a terra (63).

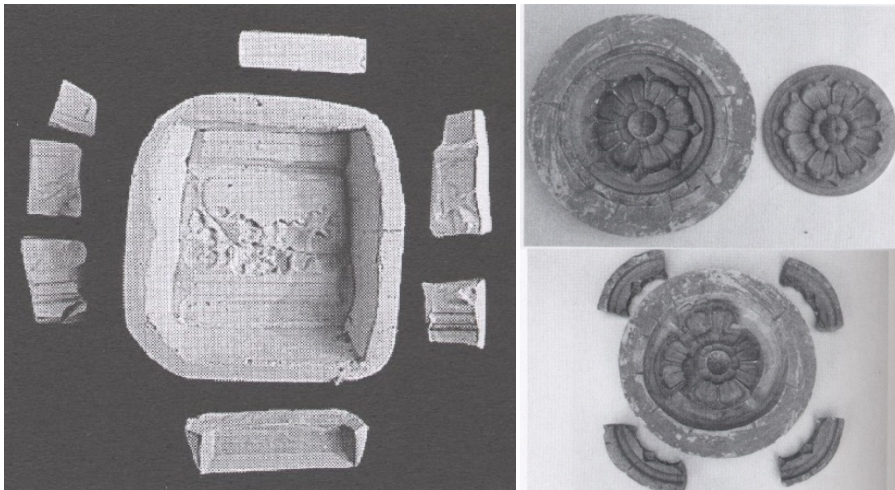


Figura 59 Forme scomponibili a tasselli in gesso, complessivamente smontabili in 8 e 9 pezzi (63).

Lo stampo veniva spalmato con apposite sostanze disarmanti per favorirne il disarmo. I disarmanti più usati erano l’olio di lino, grassi animali o vegetali, la colla di pesce o il sapone di Marsiglia sciolto in acqua calda. La matrice ben asciutta, veniva imbibita con una soluzione di olio di lino cotto e poca acqua ragia. Dopo l’essiccazione la superficie veniva verniciata inizialmente con la stessa miscela per renderla lucida e impermeabile, ed infine con una ulteriore mano di vernice a spirito, composta da due parti di gomma lacca cristallizzata tenuta in fusione in cinque parti di alcool. In questo modo veniva reso meno deteriorabile il gesso e si evitavano dannosi assorbimenti d’acqua. Per le forme di gelatina l’impermeabilità dello stampo era garantita dall’applicazione di tre mani di minio temperato in olio di lino cotto. Tali forme erano ottenute spennellando

Preparazione dello stampo

sull'oggetto da riprodurre colla o gelatina animale (dopo opportuno trattamento antiadesivo) ed erano ospitate in una base di gesso per evitare la deformazione del modello (10, 14).

Calco

Nel sistema a calco, dopo aver preparato lo stampo con dei distaccanti, si preparava l'impasto con cemento, sabbia lavata ed asciutta ed ossidi, aggiunti in piccole quantità per colorare l'impasto. Questa "miscela cementizia" veniva stesa su di un tavolo, e la si bagnava a pioggia per inumidire il tutto omogeneamente. Successivamente si eliminavano eventuali grumi, passando la malta attraverso un idoneo setaccio, e si compattava la malta nello stampo per uno spessore compreso tra i 4 mm ed i 2 cm, a seconda della pezzatura della graniglia. Subito dopo si ricreava la scabrosità delle superfici interne, utilizzando un pennello bagnato oppure con la tecnica dello "spolvero" (cospargere la superficie con polvere di cemento grigio). Infine si riempiva lo stampo con una malta fluida e grossolana confezionata con una parte di cemento e due di renoncino (50% sabbia e 50% ghiaietto). In questa fase, se necessario, si procedeva

Sformatura

anche all'inserimento di eventuali armature metalliche⁵¹. Dopo almeno ventiquattro ore (ma si poteva lasciare riposare anche fino a quattro giorni) la copia poteva essere sformata su di un letto di sabbia, anche se solo dopo molti giorni raggiungeva la sua massima durezza e si doveva provvedere a continue bagnature⁵², lasciando l'elemento architettonico in un ambiente buio per almeno un mese. Le forme piccole potevano anche essere immerse nell'acqua, oppure le si poteva ricoprire con stracci costantemente bagnati; ancor meglio se si seppellivano sotto uno strato di sabbia, mantenuta anch'essa adeguatamente umida (10, 38).

Sistema per colaggio

Il sistema per colaggio si effettuava quando lo spazio dello stampo era ristretto. Dopo aver unto la forma con idonee soluzioni disarmanti, si preparava un impasto fluido costituito da una parte di cemento colorato e una di sabbia, che veniva versato nello stampo agitando continuamente la forma per eliminare eventuali bolle d'aria (10).

⁵¹ In alcuni casi gli strati di cui era composta la pietra artificiale potevano essere anche tre. In tal caso dopo il getto del primo strato (4 mm) ne seguiva un secondo spesso circa 2 cm composto da cemento grigio, sabbia fine ed acqua, infine il terzo strato veniva gettato dopo la posa delle armature con il medesimo impasto del secondo strato (47).

⁵² «La contrazione superficiale e le conseguenti fessure possono evitarsi togliendo i saggi dall'azione assorbente dell'aria nel periodo d'indurimento, col ricoprirli totalmente di uno strato di sabbia bagnata o coll'immergerli nell'acqua per un periodo di circa 28 giorni. [...] E' stata evitata ogni screpolatura ricoprendo le pietre con una forma di sabbia o argilla tenuta costantemente umida od immergendole completamente nell'acqua per quel periodo di tempo necessario al cemento per conseguire la completa cristallizzazione. [...] La superficie deve essere tenuta umida o con uno strato di sabbia, innaffiato di continuo ed abbondantemente o con una completa fasciatura di stracci umidi» (64).

Alcuni degli stampi che venivano adottati sono quelli a forma matta (o perduta) e quelli a pressione⁵³. La forma matta veniva così chiamata perché serviva una sola volta, dovendola distruggere per estrarre il pezzo gettato. In genere si adoperava poltiglia di gesso che in alcuni casi poteva venire irrobustita da fasci di canapa o stecche di legno e talvolta anche di ferro. Si procedeva nel seguente modo: dopo aver lavato accuratamente la forma matta, la si spalmava di un isolante adatto (acqua e sapone, olio di lino e acqua, gommalacca diluita, soluzione molto diluita di cera, ecc.) e si gettava la malta. Prima che tale strato si fosse essiccato si dava inizio al getto successivo. Si iniziava poi la sformatura, distruggendo gradatamente la forma a perdere con scalpello e martello, sino a raggiungere lo strato sottostante (46).

Una volta che gli elementi erano pronti questi venivano assemblati in opera e giuntati. Dopo aver definito in fase di progetto come scomporre le decorazioni si definiva come assemblare ogni singolo blocco in opera. Le giunzioni dei pezzi venivano eseguite tra le pieghe plastiche dei rilievi e negli angoli rientranti per nasconderle. Gli ancoraggi venivano realizzati tramite elementi metallici come zanche o spine di collegamento (16, 35). Gli elementi di grandi dimensioni invece si confezionavano direttamente sulla facciata: le armature del getto venivano fatte sporgere dalla facciata e lo stampo veniva appoggiato e fissato alla parete, infine si procedeva al getto (65).

⁵³ «Le forme a pressione si preparano generalmente con gelatina, resa plastica al punto voluto e capace di ricevere l'esatta impronta del modello mediante un'azione prolungata a pressione sul modello, rappresentato molto spesso, da medaglie o bassorilievi di poco aggetto» (46).

1.5 Trattamenti superficiali

Omogeneizzazione- I trattamenti superficiali avevano lo scopo di imitare la *texture* superficiale delle pietre naturali⁵⁴. Dopo il disarmo l'elemento architettonico appariva macchiato, a causa dello strato superficiale di calce e cemento affiorato in superficie durante la presa. I decori quindi dovevano essere omogeneizzati cromaticamente, eliminando tale strato e lasciando in vista quello inferiore. Tra i vari trattamenti che si potevano eseguire c'erano quelli chimici utilizzando soluzioni di acido solforico, cloridrico, nitrico. Nel

Trattamenti con acidi e sfregamento trattamento chimico il grado di diluizione dell'acido dipendeva dall'esperienza dell'operatore e dall'età del calcestruzzo. Tanto più il calcestruzzo era vecchio e tanto più forte doveva essere la soluzione, nel caso di due settimane l'acido solforico doveva essere diluito in tre parti d'acqua, se invece era di pochi giorni con cinque o sei parti d'acqua (45). Al termine dell'operazione, bisognava controllare con cura che non fossero rimaste tracce dell'acido sulla superficie, che altrimenti rimaneva scolorita. Un altro tipo di trattamento consisteva nello sfregamento con pezzi di pietra calcarea, acqua e sabbia della superficie quando la malta aveva solo tre o quattro giorni. Un effetto simile a quello ottenuto per sfregamento era quello che si otteneva con gli spruzzi di sabbia⁵⁵, con i getti d'acqua, spazzole di ferro o scalpelli acuminati. Se la pietra

Martelli-natura artificiale si era indurita, era infatti possibile lavorarla come quella naturale con scalpelli e martelline. La martellinatura⁵⁶, eseguita con mazzuolo ad una o più punte, poteva

⁵⁴ Per l'imitazione delle arenarie nelle scale si era soliti trattare con lo scalpello sia la superficie delle alzate che delle pedate per migliorare l'effetto mimetico mentre i marmi e le pietre calcaree venivano di solito lucidate. I finti graniti invece non venivano sottoposti ad alcun trattamento se non il lavaggio con acidi per rimuovere la pellicola superficiale di cemento (66).

⁵⁵ «Per mezzo della sabbia soffiata si può ottenere un aspetto quasi simile a quello prodotto dal fregamento. E' indispensabile avere una soffieria adattata per questo genere di lavori, ed occorre adoperare sabbia molto dura e preferibilmente con grani angolari. Un tubo soffiante di 1,2 cm di diametro darebbe risultati assai poco soddisfacenti, perché se un eccesso di cemento rimanesse alla superficie di un angolo o di una commettitura, la sua durezza non permetterebbe l'azione tagliente della sabbia, mentre le parti più tenere vicine sarebbero asportate, producendo così una prominenza. Così pure, una parte più tenera formata da una larga screpolatura sulla quale il cemento scorre lasciando la sabbia da parte, darebbe per risultato un taglio più profondo con un soffietto largo. [Il becco] deve essere tenuto a qualche centimetro di distanza dalla superficie che si vuole intaccare» (56).

⁵⁶ «Quando il cemento ha tre o quattro giorni, un operaio può martellinare una superficie 4-5 volte maggiore di quella che tratterebbe se il cemento avesse due o più settimane. La struttura però differisce, perché quando il cemento è completamente fresco ne viene scagliata una gran quantità ed a differenza profondità stante che alcune particelle vengono scrostate dalla superficie; la struttura risulta quindi molto più rustica di quanto il lavoro è fatto dopo che il cemento è indurito. Su questo invece la superficie ha una struttura fina e completamente uniforme. Dal modo con cui viene adoperato il mazzuolo si può ottenere una piccola varietà nell'aspetto della superficie. Picchiando perpendicolarmente non risulta segno alcuno

essere eseguita anche con cemento parzialmente fresco. In questo modo la lavorazione era più rapida e conseguentemente più economica con una struttura finale del calcestruzzo più rustica. Se la superficie era indurita la lavorazione veniva eseguita con martelli e spazzole metalliche che conferivano una *texture* più fine ed uniforme (17, 43, 45, 55, 67).

La subbiatura permetteva di ottenere incisioni più rustiche e profonde come i bozzati ad alto rilievo plastico (lo strato di malta pigmentata doveva essere almeno di 5-6 mm). La martellinatura permetteva invece di creare differenti effetti cambiando l'inclinazione dello scalpello (linee parallele o con diverse angolature). Se la martellina era provvista di dentatura, si otteneva un effetto simile alla filigrana. Il costo della lavorazione su superfici indurite era molto superiore rispetto a quello eseguito su superfici non ancora del tutto indurite, ma il risultato finale garantiva una maggiore durabilità nel tempo. Per evitare irregolarità superficiali all'interruzione del lavoro fra una giornata e l'altra, venne introdotto l'uso del bugnato, le cui scanalature permettevano di interrompere la lavorazione senza che ciò risultasse evidente (17, 43, 45, 55, 67, 68).

Non tardò a diffondersi, dato il successo delle superfici martellate, l'uso degli utensili pneumatici con martelli⁵⁷ (Figura 60), martelline e spianatrici⁵⁸ azionati da piccoli impianti a motore, già introdotti per trattare la pietra. Gli impianti per l'azionamento di utensili per la lavorazione delle pietre artificiali erano composti dal motore, dal compressore, dal refrigerante e dal filtro d'aria montati sopra uno stesso basamento di legno o di ghisa che poteva essere, all'occorrenza, facilmente rimosso. Un'installazione simile poteva azionare da uno fino a dieci martelli pneumatici, vale a dire che con essa

*Utensili
pneumatici*

dello strumento sulla superficie, mentre che da un colpo obliquo rimangono delle linee, le quali possono essere fatte tutte parallele fra loro od a vari angoli ed in tal modo ne può risultare una certa varietà» (56).

⁵⁷ Il martello *Dallett* era composto da: un cilindretto d'acciaio, chiuso da una parte da un coperchio, nel quale s'innestava il tubo di gomma che conduceva l'aria compressa. Dalla parte opposta, si introduceva la testa dello scalpello col quale si voleva eseguire l'operazione. L'operaio impugnava il martello con la destra come se adoperasse il mazzuolo ordinario, e guidava con la sinistra lo scalpello come nel vecchio sistema (69).

⁵⁸ Per le martellature più impegnative situate in orizzontale e su superfici estese (come le fasce esterne di zoccolature o pilastri), si utilizzava una spianatrice mobile a ruote libere o con guida a binario: il martello è posto su un braccio regolabile, retto da un sostegno verticale. «Per le operazioni di martellatura in cantiere si adoperano vantaggiosamente delle macchine formate da una colonna di ferro sorretta da una base solida di ghisa che può correre su ruote libere o sopra un binario. Lungo la colonna scorre e ruota un manicotto di ghisa che porta un braccio orizzontale a snodo. All'estremità di questo braccio si trova un martello *Dallett*, al quale si adatta una martellina. Si pone la macchina presso il blocco da spianare o martellare, con manovra semplicissima si registra l'altezza del braccio orizzontale ed un operaio guida, per mezzo della maniglia posta attorno al martello, l'utensile su tutta la superficie da lavorare» (69).

si poteva eseguire nello stesso tempo il lavoro di dieci operai scalpellini lavoranti con mazzuolo comune. Tali strumenti erano collegati a un gruppo motore-compressore, che spesso era mobile per poter essere trasportato in cantiere.



Figura 60 Martellinatura eseguita con martello pneumatico (70).

Un'ulteriore lavorazione era la lucidatura della pietra artificiale eseguita con una pulitrice mobile a rotazione dotata di un disco di ghisa nel quale erano inseriti dei blocchetti di smeriglio con i quali era possibile ottenere una lucidatura particolarmente brillante, difficile da ottenere a mano (69, 70).

Levigatura

La levigatura consisteva nello sfregare una pietra molto dura sulla superficie bagnata, eventualmente aiutandosi con l'“orso” (uno strumento costituito da un manico di legno con elemento ad U in metallo posto all'estremità nel quale veniva inserita la pietra). Dopo questa operazione si procedeva ad una seconda levigatura di precisione con una pietra più tenera (pietra arenacea locale) (47).

Pitture

Le pietre artificiali, oltre ai trattamenti precedentemente descritti, per ottenere un prodotto il più possibile simile alle pietre naturali potevano venire tinteggiate. La tinteggiatura era una tecnica assai diffusa, come dimostrano diversi articoli apparsi sulle riviste dei primi anni del '900 (71-73), ma il risultato finale era molto diverso dalle lavorazioni superficiali eseguite su decorazioni ottenute con impasti selezionati, in quanto il prodotto non imitava al meglio le corrispondenti pietre naturali (veniva infatti ignorato l'aspetto della *texture* superficiale, dal momento che il colore diventava omogeneo). Normalmente questo tipo di lavorazione compariva su prodotti di costo

limitato, oppure nei casi in cui lo stesso progettista voleva creare volutamente dei decori colorati, come nel caso di Casa Donati in piazza Mazzini a Modena dell'ing. Arturo Prati (Figura 61 e Figura 62) in cui le pietre artificiali sono dipinte in modo da riprodurre i colori delle rose e delle foglie, e nel villino Galeotti a Firenze dell'arch. Giovanni Michelazzi in cui si voleva imitare la pietra forte per evidenziare i settori di collegamento tra le aperture del pian terreno e quelle del primo piano, i mensoloni di sostegno del balcone e le spesse incorniciature semicircolari delle due porte-finestre del primo piano (Figura 63).

In ogni caso va sottolineato come sia difficile allo stato attuale riconoscere se le tinte presenti siano conformi a quanto previsto dal progetto originale dell'architetto, oppure frutto di interventi successivi di abbellimento, a meno di documenti d'archivio o testimonianze storiche, come nel caso del villino Lampredi a Firenze dove i recenti lavori di restauro hanno cambiato colore alle ali dei draghi nei balconi (Figura 64) e nel villino di Adolfo Coppedè (Figura 65 - Figura 67) oggi interamente tinteggiato sia negli intonaci che nelle decorazioni.

La principale causa di degrado della pittura sul cemento era la presenza di calce libera che saponificava gli oli e le vernici dei colori che venivano applicati sul cemento. Per evitare macchie ed alterazioni cromatiche che rovinavano le superfici si utilizzavano tre sistemi differenti:

- eliminazione della calce lavando la superficie del cemento con acido cloridrico o solforico diluito in acqua oppure con carbonato d'ammoniaca;
 - utilizzo di apposite pitture speciali⁵⁹ come quelle a base di colori minerali (marmo o pirite calcinata e polverizzata), latte di calce ed ossido di cromo. Queste pitture venivano applicate sul cemento a presa avvenuta e dopo la posa la superficie veniva inumidita per almeno una settimana;
 - pittura su supporto reso impermeabile attraverso impregnazioni di colla forte od olio.
- (71, 72, 73).

⁵⁹ Una pittura speciale per colorare le superfici di cemento era il Cimentol che permetteva anche di ottenere delle decorazioni in falso legno ed in falso marmo. Per cementi lisci il Cimentol poteva essere applicato col pennello direttamente sulla superficie mentre per superfici rivide era necessario creare uno strato di intonaco con del bianco di Meudon e del bianco a base di zinco. Anche la Società Anonima *Rathenoicer Chemischen und Farben Industrie* a Rathenow in Germania si occupava quasi esclusivamente della produzione di colori per pietre artificiali, mattonelle, cementi per intonaco, ecc. (72, 73).



Figura 61 Casa Donati, p.zza della Libertà (ora p.zza Mazzini 8-11) Modena, Arturo Prati, 1905.



Figura 62 Particolare dei decori floreali dipinti (la pittura non è quella originale ma sono state rispettate le cromie), casa Donati, p.zza della Libertà (ora p.zza Mazzini 8-11) Modena, Arturo Prati, 1905.



Figura 63 Villino Galeotti, via XX settembre 72, Firenze Arch. Giovanni Michelazzi, 1915.



Figura 64 Particolare del drago che sorregge il balcone dopo l'intervento di restauro (a destra). Villino Lampredi via Giano della Bella 13, Firenze, arch. Giovanni Michelazzi, 1908-1909.



Figura 65 Villino in via Orcagna 53, Firenze, Adolfo Coppedè, 1902.



Figura 66 Villino in via Orcagna 53, Firenze, Adolfo Coppedè, 1902.



Figura 67 Villino in via Orcagna 53, Firenze, Adolfo Coppedè, 1902.

1.6 Manufatti in pietra artificiale

Cornici

Le decorazioni di facciata, come i cornicioni, venivano preparati in laboratorio ed applicati successivamente in cantiere. I cornicioni di coronamento per le costruzioni in cemento armato venivano invece gettati contemporaneamente al solaio dell'ultimo piano (74). Le decorazioni semplici come le cornici, le bozze od il rivestimento di colonne venivano eseguite in 3 strati: rinzafo, l'arriccio e l'intonachino. Il rinzafo doveva avere un ancoraggio ottimale al supporto ed una scabrosità tale da garantire un aggrappaggio altrettanto stabile per gli strati successivi, tale strato era composto da sabbia di granulometria medio-grossa in quantità pari a circa 2,5 volte il legante cementizio. Quando il rinzafo si era indurito si procedeva ad una bagnatura per stendere l'arriccio (2 cm di spessore) e l'intonachino (2-3 mm). La malta dell'arriccio doveva essere ben pressata, per evitare la formazione di cavillature da ritiro o fessurazioni e veniva preparata con un rapporto legante-aggregato di 1:3. L'intonachino doveva essere steso nella stessa giornata di lavoro dell'arriccio per avere la completa omogeneità del manufatto, inoltre, dato che in questa fase era importante una buona compressione, l'applicazione della malta veniva eseguita con cazzuola e successivamente stesa con il modano facendolo scorrere sempre nello stesso verso (Figura 68). Infine, per ottenere un manufatto omogeneo si piallavano le superfici con idonei strumenti in legno, accompagnando l'operazione con bagnature non eccessive. Durante l'estate la stagionatura del manufatto doveva essere protetta dall'esposizione diretta al sole e mantenuta umida con stracci bagnati. Il velo era composto da un cemento pigmentato a secco, sabbia fine e lavata con rapporto sabbia/cemento 1:1 e acqua. Per la realizzazioni di cornici lineari e curve sono fondamentali i modani (Figura 69 - Figura 70) ed i marciamodani, questi ultimi venivano fissati sulla facciata attraverso il filo a piombo. I regoli venivano applicati al muro tramite sargenti infissi nelle committiture dei conci e "punti" provvisori in gesso da presa, posizionati come piccole mensole triangolari dalla parte in cui non avveniva lo scorrimento del marciamodano. Successivamente venivano applicate le ossature in laterizio nella giusta collocazione e dimensione per garantire il giusto scorrimento del marciamodani.

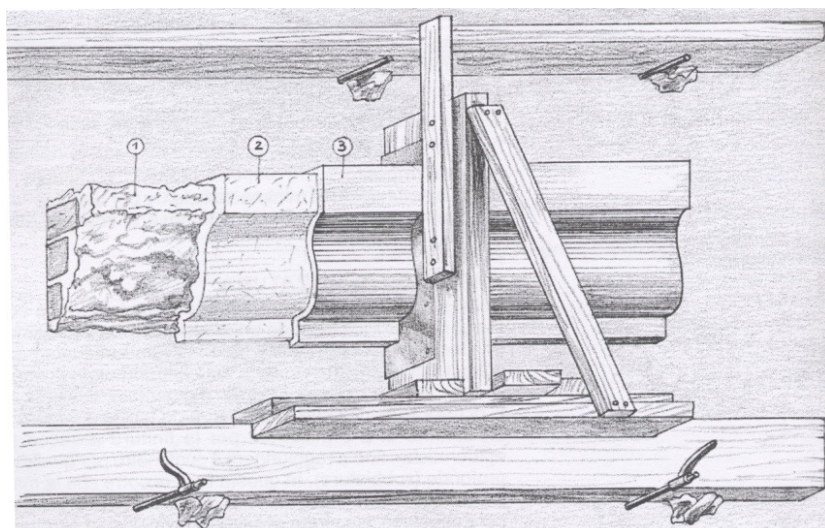


Figura 68 Realizzazione di una cornice lineare. 1 Ossatura ricoperta da schizzata, 2 Malta d'arriccio applicata a cazzuola, 3 Arriccio già plasmato dal ripetuto scorrimento del modano (10).

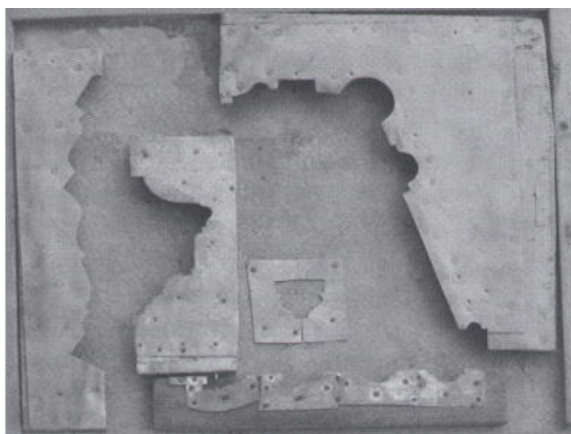


Figura 69 Esempi di modani: in alto a destra un modano ritagliato per formare lo stipite di un vano porta, in basso si notano più modani uguali montati sullo stesso telaio ligneo per tirare a piè d'opera quattro cornici contemporaneamente (63).



Figura 70 Modano montato su telaio, a sua volta montato su di un marciamodano per la realizzazione di un guscio di rivestimento di una colonna (63).

Le bozze invece venivano realizzate utilizzando dei modani in una o due file alla volta *Bozze e colonne* in senso orizzontale partendo dall'alto, e poi alla stessa maniera anche in file verticali. Dopo aver realizzato le prime file, in alto al marciamodano si applicava un idoneo tacchetto da far scorrere nel canale di partitura già formato, mai inferiore a 2 cm. Le colonne venivano realizzate con la stessa tecnica, ma avvalendosi di strumenti modificati per il caso. Dopo aver creato la struttura di base in laterizio si montavano le “sciarpe”, cioè anelli in legno formate da due semiparti abbinabili tra loro con la funzione di regolo di scorrimento e appoggio al marciamodano. Il modano (adeguatamente curvato) veniva a sua volta montato su di un carrello curvo dotato di

due sottostanti tacchetti, impernati e mobili. In alto, allo stesso modo per segmenti o per l'intero fusto della colonna, veniva posizionata una guida, al fine di seguire sovrapponendosi, la superficie esterna dell'anello di riferimento (Figura 71 - Figura 74).

Finto Il cemento era utilizzato anche per imitare il paramento murario (Figura 75 - Figura 76).

laterizio La tecnica consisteva nel preparare una malta a base di cemento, sabbia e pigmenti (come polvere di mattoni) che veniva applicata su di una superficie di malta cementizia ancora fresca di colore grigio chiaro, in modo che quando si incideva lo strato colorato (attraverso idonei regoli di appoggio) si ritrovava lo strato grigio sottostante ad imitazione della fuga dei mattoni (10).

Piastrelle Uno dei primi utilizzi del cemento artistico consisteva nella realizzazione di pavimenti gettati in opera (pavimenti alla palladiana, alla veneziana, a mosaico) e nella produzione di mattonelle decorate. Il legante utilizzato variava molto da una ditta all'altra: il cemento Portland (preferito dallo stabilimento Felice Taroni di Milano, 1881), cemento a lenta presa (Società Anonima Vianini, 1880), cemento bianco (ditta fratelli Pesenti, poi Società Anonima di Cementi e Calci Idrauliche, fino al 1933). Le prime piastrelle erano composte da tre strati diversi di conglomerato: strato superficiale (5 mm, rapporto cemento/sabbia c/s = 3:1) con aggiunta di colorante, strato intermedio (c/s 1:1) ed inferiore (c/s 1:4-5). Col passare del tempo gli strati si ridussero a due: quello inferiore (c/s 1:3), quello superiore con cemento e coloranti a cui si aggiungevano polvere, graniglia o scaglie di marmo (rapporto 1:2). Tali proporzioni variavano però in base al prodotto che si voleva realizzare, ad esempio erano differenti per la produzione di piastrelle in granito (31). Per fabbricare le piastrelle a mano si utilizzavano dei banchetti nei quali la forma veniva riempita con un impasto grossolano (sottofondo) e lo si ricopriva con uno strato più fine di malta di cemento talvolta colorata (75). Erano presenti inoltre delle presse a pedale e a mano come quelle brevettate dalla ditta Carius di Lipsia (Figura 77).

Il processo di produzione⁶⁰ delle piastrelle in cemento prevedeva di versare i due impasti in tempi successivi all'interno di piastre d'acciaio di apposito formato, questi

⁶⁰ Il cementista Assirelli di Rocca San Casciano riporta le procedure per la realizzazione delle piastrelle in cemento. Per la lavorazione delle piastrelle si appoggiava su di un balcone una piastra di ottone delle dimensioni maggiori dell'oggetto ed una cornice quadrangolare in metallo alta circa 2 cm per definire il perimetro della piastrella. All'interno di tale piastra si posava un altro profilo metallico alto solo pochi millimetri che riportava il disegno finale. La piastra di ottone veniva cosparsa di olio per facilitare il distacco e dare una maggiore impermeabilità all'elemento finito. Successivamente si colavano gli impasti preparati nelle diverse colorazioni all'interno delle maglie del profilo metallico attraverso dei cucchiaini. Su questo strato veniva eseguito lo "spolvero" cioè si posava un leggero strato di cemento grigio con un setaccio a maglie sottili per garantire una migliore aderenza con i getti successivi. Prima del completo

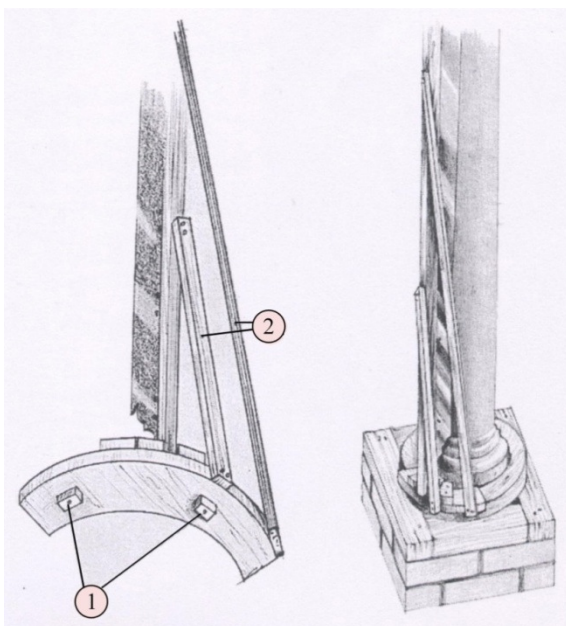


Figura 71 Realizzazione in opera di una colonna.
1 Tacchetti mobili, 2 Maniglie (10).

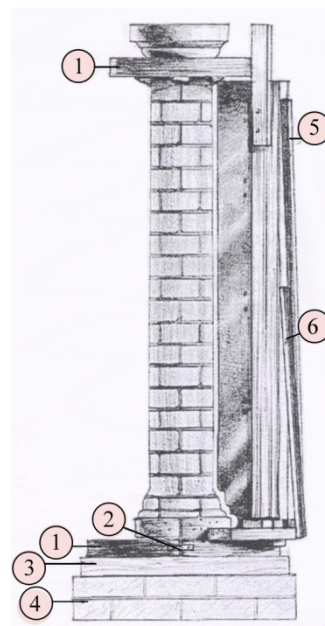


Figura 72 1 sciarpa superiore e sciarpa inferiore, 2 giunto metallico per l'accoppiamento delle semiparti delle sciarpe, 3 telaio in legno, 4 basamento provvisorio in mattoni, 5 maniglia grande, 6 maniglia piccola (10).



Figura 73 Esempio di colonna rivestita presso la Rocchetta Mattei, Riola di Vergato, Bologna.



Figura 74 Particolare della colonna rivestita presso la Rocchetta Mattei, Riola di Vergato, Bologna.

indurimento si estraeva la griglia e poi si colava il secondo impasto composto da cemento grigio, sabbia medio-fine ed acqua. Al termine di queste operazioni si eseguiva la pressatura con una pressa ancorata al soffitto che serviva per compattare il getto e rendere la superficie liscia. Infine si rimuoveva la lamina quadrangolare e si faceva essiccare la piastrella in un essiccatoio composto da diversi ripiani con scansie dove alloggiare le piastrelle (47).



Figura 75 Rivestimento ad imitazione del paramento faccia vista, presso il villino in via Audinot 9, Bologna, Paolo Sironi, 1905.



Figura 76 Particolare del rivestimento ad imitazione del paramento faccia vista, presso il villino in via Audinot 9, Bologna, Paolo Sironi, 1905.

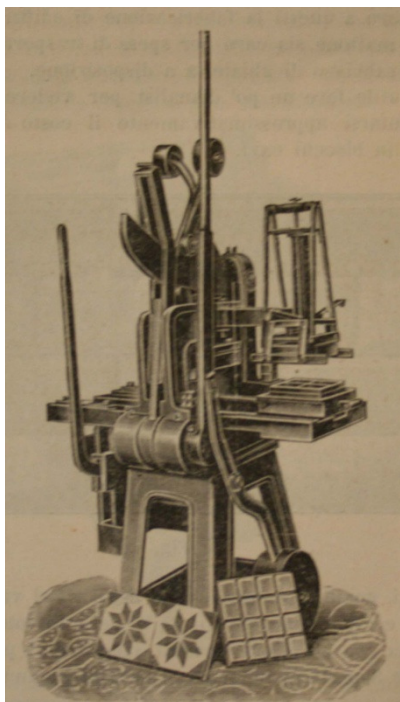


Figura 77 Pressa a leva di trazione, ditta Carius Lipsia (Germania), utilizzata per la fabbricazione di piastrelle di dimensioni maggiori, pietrini, pavimentazioni stradali fino al formato 30x30 cm (76).

erano compressi (dopo assestamento per vibrazione del primo strato di impasto e aggiunta del sottofondo) attraverso torchi idraulici o presse automatiche⁶¹ (31). Lo stampo, che era l'elemento essenziale della pressa, poteva essere in un solo pezzo, bullonato o con maniglie per l'apertura e la chiusura. Ogni stampo si componeva di un sottofondo (o piano inferiore levigato), di un anello mobile che formava la parte laterale dello stampo e del tampone che era la parte superiore (75). Infine le piastrelle venivano sformate, stagionate (dopo 24 ore le si collocava per 4-6 settimane in ambiente umido, ed infine 4-6 mesi all'aperto) e levigate come gli elementi in pietra artificiali ottenuti con stampi.

La realizzazione dei decori nelle piastrelle veniva fatta utilizzando delle dime metalliche (divisioni in bronzo sagomate a seconda del disegno), posizionate in piastre d'acciaio all'interno delle quali venivano versate le varie miscele di diverso colore. Tale operazione veniva eseguita attraverso un apposito mestolino in rame o con rudimentali strumenti come cucchiaini od imbuto, oppure sistemi più sofisticati come quello brevettato dalla ditta tedesca Carius⁶² nel 1908, che consisteva in un sistema di distribuzione dei colori con griglie passanti, capace di ridurre lo spreco di materiale. Dopo aver versato gli impasti colorati si scuoteva per bene lo stampo attraverso le apposite maniglie applicate al sottofondo per stendere bene i colori. Con un gesto rapido venivano poi tolte le dime attraverso una pinza e l'operaio con un piccolo setaccio metteva lo spolvero livellandolo con una piastrina di ferro. Le piastrelle prodotte dalla Società

Decorati

⁶¹ «Le piastrelle vengono compresse mediante una pressa a leva funzionante a mano, oppure meglio con un torchio idraulico azionato da una pompa. Può servire anche una pressa idraulica a piatto rotante; in generale le presse idrauliche sono da preferirsi a quelle a leva perché in queste la pressione è molto minore. Prima però si formano le piastrelle mescolando bene la massa granitoidale in una forma di acciaio, interponendo fra il fondo della forma e la materia da comprimere una lastra pure di acciaio, [...] destinata a sostenere la piastrella, quando la si toglie dal torchio. Versata la massa granitoidale nella forma, la si scuote, battendo in pari tempo con un mazzuolo di legno, per eliminare quanto è possibile i vani nell'interno di essa. Quindi si versa sopra il *béton* che formerà lo strato inferiore. [...] Finalmente si procede all'operazione della compressione, impiegando tre operai» (77).

«Tali presse devono poter esercitare una pressione fortissima per coagulare sufficientemente i grani di sabbia ed il cemento della miscela. Come pressione per queste macchine i costruttori indicano per le piastrelle d'uno spessore medio di 25 mm una pressione di 75 kg/cm², cifra che può naturalmente variare più o meno per certe piastrelle» (78).

⁶² «Da alcuni anni la ditta Carius ha messo sul mercato i suoi modelli a scatola per distribuire i colori [...] Un vantaggio tutto particolare di questi speciali modelli è che permettono di spargere i differenti colori in uno strato assolutamente eguale e di delimitarli nettamente gli uni dagli altri. Senza alcun cambiamento, si può modificare a volontà lo spessore dello strato colorato della piastrella. [...] L'apparecchio [il mulino mescolatore di colori] è provvisto di una chiusura in forma di segmento che permette di riempirlo molto facilmente; di modo che è possibile mescolare alternativamente colori di tinte diverse senza perdita di tempo» (76).

Anonima per la fabbricazione dei cementi di Casale Monferrato in occasione dell'Esposizione industriale italiana di Milano (1881) sono tra i primi esempi di piastrelle di cemento (31, 75).

Textile block

Particolarmente importanti per lo sviluppo del cemento decorativo prefabbricato e modulare sono i lavori di Auguste Perret⁶³ e Frank Lloyd Wright⁶⁴. Perret nella chiesa di *Notre-Dame de Consolation* (Le Raincy, 1922, Figura 78) utilizzò tamponamenti che erano costituiti da pannelli traforati in cemento che riproducono i motivi della croce, del cerchio, del triangolo e del rettangolo. Frank Lloyd Wright nelle case realizzate in California tra il 1923 ed il 1924 brevettò un sistema di blocchi modulari chiamato *textile block* composto da elementi 40x40x8 cm dal peso di 20-25 kg e rinforzati da un'armatura diffusa per la costruzione di solai e pareti (Figura 79 - Figura 80). Era possibile realizzare anche pannelli murali con figure a bassorilievo con un procedimento del tutto simile agli elementi decorativi ottenuti con gli stampi e successivamente stagionati e lavorati superficialmente (31).

Blocchi

Molte riviste del tempo riportavano la diffusione del cemento nel campo dell'edilizia anche per la costruzione di mattoni cavi. I mattoni avevano grande successo non solo in Italia ma anche negli Stati Uniti ed in Europa come testimoniano diversi brevetti, in quanto gli edifici risultavano incombustibili, meno umidi e ben isolati grazie alle camere d'aria presenti all'interno di ogni blocco. In alcuni casi (come nella chiesa di *St. Jean de Montmartre* di Anatole De Baudot⁶⁵, Figura 81 - Figura 82) venivano utilizzati

⁶³ Auguste Perret (Exelles, 1874 – Parigi, 1954). Figlio di un repubblicano esule, di famiglia artigiana, nacque in Belgio e venne a Parigi nel 1881 coi fratelli Gustave e Claude. Studiò all'*École des Beaux Arts* e nel 1905 aprì, prima uno studio di architettura, poi un'impresa di costruzioni '*Perret frères entrepreneurs*'. Una delle prime opere della nuova impresa è la casa in *rue Franklin* a Parigi (1905), nella quale per la prima volta la struttura portante è in cemento armato. Seguono l'autorimessa in *rue Ponthieu* (1906), il teatro di *Nôtre Dame de Raincy* (1926), la chiesa di Santa Teresa di Montmagny, con l'uso innovatore del calcestruzzo a vista e i rivestimenti parietali in vetro. Dal 1947 Perret curerà la ricostruzione di *Le Havre*, utilizzando la prefabbricazione di elementi modulari (79).

⁶⁴ Frank Lloyd Wright (Richland Center, Wisconsin, 1869 - Phoenix, Arizona, 1959). Frequentò la Scuola di Chicago e lo studio di Sullivan e Adler, Massimo esponente della nuova architettura organica, nel primo periodo della sua attività si riscontrano motivi di carattere *Art Nouveau*. Tra le opere più importanti: *Prairie Houses* (1901), *Unity Temple* ad Oak Park in Illinois (1904), *Robie House* a Chicago (1906), il complesso di *Taliesin* (1911-1915-1932), casa *Kauffmann – Fallingwater* (1935), la torre per la *Johnson Wax* a Racine in Wisconsin (1950), *Guggenheim Museum* di New York (1956-1959) (79).

⁶⁵ «Che il cemento armato sia capace di darci delle costruzioni monolitiche, e quasi omogeneamente resistenti, nessuno lo pone più in dubbio. Il nuovo mezzo di costruzione ci offre dei vantaggi che erano stati pienamente sconosciuti fino ad oggi, specie fra questi l'unione perfetta di tutte le parti fra loro e l'economia della costruzione. [...] L'architetto Baudot non si è servito però nelle sue costruzioni del vero cemento armato, gettato in opera e dotato quindi di un perfetto collegamento fra le parti: egli ha adottato invece un modo di costruzione più comodo e che gli è parso insieme più economico, che non possiede però in grado così elevato le proprietà del cemento armato. Le pareti verticali e i sostegni sono formati da

anche in accoppiata al tradizionale getto di calcestruzzo con i ferri longitudinali. Inoltre la posa in opera risultava semplice ed economica poiché i blocchi permettevano un minore impiego di materiale.



Figura 78 Chiesa di *Notre-Dame de Consolation*, Le Raincy, Auguste Perret, 1922 (80).



Figura 79 The Alice Millard House, La Miniatura, Pasadena, Frank Lloyd Wright, 1923 (81).



Figura 80 Particolare del *textile block* nella Samuel Freeman House, Los Angeles – Hollywood Boulevard, California Frank Lloyd Wright, 1923 (81).

blocchi cavi collegati con filo di ferro e cemento: i pilastri però vengono riempiti nel vano interno con un nucleo di vero *béton armé*. I solai e le volte, sia semplici che doppie, sono costituite da due elementi: lastra o soletta e nervatura. La prima è sempre costruita di getto dello spessore di 7 cm; la nervatura invece, molto sottile anch'essa e sporgente da 20 a 50 cm, secondo le portate, se visibile, è formata di blocchi cavi collegati al solito modo. L'armatura metallica è foggata sul tipo Cottancin: dentro la soletta, un reticolato di ferro cui si collegano i ferri della nervatura» (82).



Figura 81 Chiesa di *St. Jean de Montmartre*, Parigi, Anatole De Baudot, 1904.

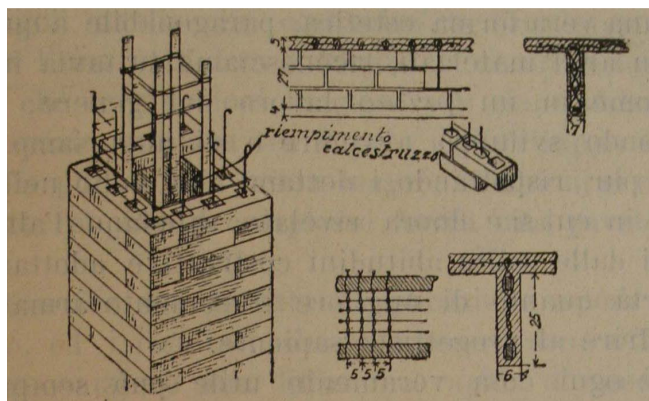


Figura 82 Particolari dei pilastri e dei solai della chiesa di *St. Jean de Montmartre*, Parigi, Anatole De Baudot, 1904 (82).

Macchina Berbet I blocchi in calcestruzzo potevano essere costruiti oltre che col cemento Portland anche con malte di pozzolana o calce idraulica, ma in questi ultimi due casi era necessario lasciarli stagionare parecchie settimane prima del loro impiego, ed è per questo che il materiale più utilizzato era il cemento. La diffusione dei blocchi cavi in calcestruzzo fu agevolata anche dall'invenzione di macchine semplici (dette mattoniere) che permettevano di realizzare blocchi cavi e decorati, come la macchina Berbet (Figura 83). Attraverso la sostituzione delle forme era infatti possibile ottenere diverse decorazioni sulla faccia che rimaneva in vista. Tali macchine inoltre potevano essere facilmente trasportate, esigevano poca manutenzione e potevano produrre fino a 3000 mattoni al giorno. Utilizzando inoltre un impasto di materiali diversi da quelli formanti il corpo del blocco, si poteva creare uno strato superficiale decorato e più resistente agli agenti atmosferici con l'aggiunta di cemento (83). Le macchine per la fabbricazione dei blocchi pieni o cavi erano moltissime, per lo più si componevano di una semplice scatola con funzione di stampo il cui fondo rimovibile era costituito da una tavolozza metallica che, dopo la sformatura, serviva per levare i blocchi freschi. La sformatura si faceva con l'aiuto di una leva, che bastava abbassare per fare emergere il pezzo. Dopo 24 ore si toglievano le tavolozze che reggevano il blocco e lo si immagazzinava per una ventina di giorni fino all'indurimento (41).

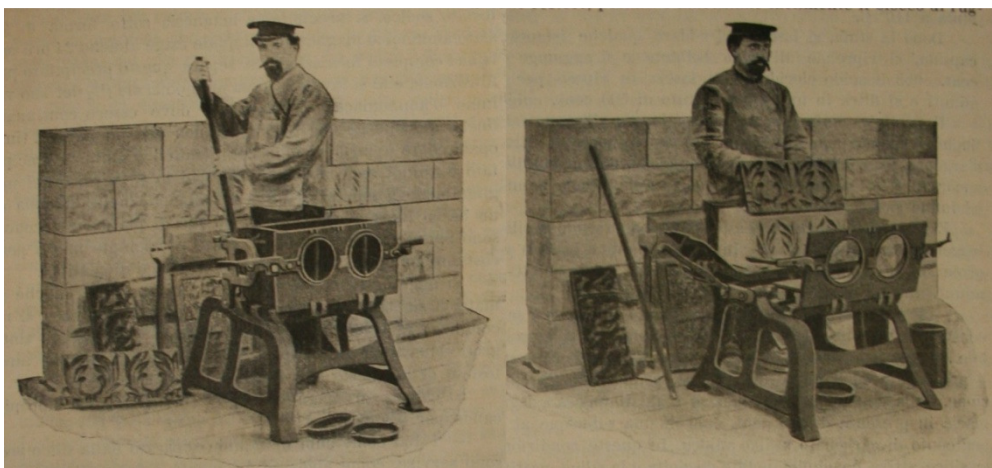


Figura 83 La macchina “Berbet” per la fabbricazione dei blocchi cavi di calcestruzzo (83).

In commercio erano presenti anche altre presse per la realizzazione dei mattoni di cemento in cui venivano riportate le ricette per gli impasti: la parte interna veniva ottenuta con 60-70 kg di cemento, 2 m³ di ghiaia e acqua, mentre quella esterna con 70-80 kg di cemento, 60 cm³ di sabbia e acqua (41).

Per colorare i mattoni si mescolavano dei pigmenti prima di passare alla fase di formatura della massa. L'aggiunta più comune era l'ocra rossa per imitare il colore dei laterizi ordinari anche se presentava due difetti: il primo era una minore resistenza del mattone agli agenti atmosferici, il secondo lo spreco di materiale che ne risultava dal momento che si aggiungeva il pigmento a tutto l'impasto e non al solo strato superficiale. Per risolvere quest'ultimo problema era stato brevettato un sistema in grado di ottenere uno strato colorato dello spessore di pochi millimetri attraverso la produzione di precipitati colorati nella massa per l'azione che si esercitava tra l'idrossido di calcio, il carbonato di calcio ed alcuni sali solubili di metalli pesanti. I sali che venivano aggiunti erano: solfato di ferro⁶⁶ (per ottenere il giallo), solfato di rame⁶⁷ (per ottenere l'azzurro), solfati di ferro e rame combinati⁶⁸ (per il verde). Le soluzioni

⁶⁶ «Facendo assorbire dalla superficie del mattone una soluzione molto diluita di solfato ferroso, si forma per reazione dell'acido solforico sulla calce del silico-calcare, il gesso che è pochissimo solubile, mentre l'ossido idrato di ferro che precipita assorbendo ossigeno dall'aria si trasforma in limonite dando una colorazione gialla al mattone» (84).

⁶⁷ «Si raccomanda per la colorazione grigio-azzurra l'uso di una soluzione di solfato di rame al 10%; oppure l'uso di una soluzione al 5% della quale si imbeve in una prima operazione lo strato superficiale del mattone, per poi lasciarlo asciugare e bagnarlo una seconda volta colla stessa soluzione. Occorrono quindi circa 300 g di solfato di rame per ogni m² di superficie da colorare» (84).

⁶⁸ «Per la colorazione verde-oliva si adopera una soluzione di due parti di solfato ferroso con 8 parti di solfato di rame in 90 parti d'acqua, ossia ancora una soluzione al 10% mista. Cambiando la proporzione relativa dei due sali cambia naturalmente anche il colore e questo permette di ottenere dopo alcuni tentativi le sfumature più delicate del verde-grigio o del verde-bruniccio» (84).

coloranti potevano essere applicate immergendo il mattone per 3-4 minuti in una vaschetta contenente la soluzione per una profondità di 5-10 mm, oppure sfregando ripetutamente le facce del mattone con un pennello largo fino al completo assorbimento. Scaldando i mattoni colorati di giallo con il solfato ferroso ad una temperatura tale da far perdere all'idrossido di ferro la sua acqua di combinazione (circa 550-600°C), il giallo si trasformava in rosso. Se invece il mattone che veniva scaldato aveva una colorazione verde oliva questo diventava rosso bruno, mentre l'azzurro diventava nero. Poiché con il riscaldamento l'idrossido di calcio si trasformava in calce viva che con la successiva idratazione fa perdere resistenza al mattone, conveniva procedere a tali trattamenti solo sui mattoni già stagionati dove l'idrossido di calcio si era già carbonatato. Il difetto maggiore che presentavano i mattoni colorati in questo modo stava nel fatto che la superficie aveva un colore decisamente più intenso dello strato sottostante, quindi anche un piccolo graffio o scheggiatura del mattone rendevano visibile questa differenza di colore (84).

1.7 Degrado

La pietra artificiale dopo quasi 150 anni dalla sua introduzione, se sottoposta ad interventi manutentivi, si presenta tutt'oggi in buono stato di conservazione e presenta al più i difetti che si possono riscontrare anche nelle pietre naturali⁶⁹. Attraverso una ricognizione del patrimonio architettonico emiliano-romagnolo, fiorentino e marchigiano che rappresentano per lo più una forma di Liberty minore non ancora sufficientemente studiata è stato possibile redigere tabelle riassuntive del patrimonio architettonico Liberty (presenti in allegato) ed individuare le patologie di degrado più diffuse. A seguito di tale studio si è riscontrato come il patrimonio locale è caratterizzato da pietre artificiali in cui non sempre l'intento mimetico era ottenuto attraverso l'uso di particolari impasti con idonei pigmenti ed aggregati. Come già analizzato nel capitolo sui trattamenti superficiali (1.5), questo intento mimetico veniva ottenuto semplicemente applicando uno strato di pittura sulla superficie dell'elemento architettonico di colore simile a quello delle pietre naturali, oppure con semplice scopo decorativo. Tale ricognizione, che è stata riassunta nelle tavole riportate in allegato, mostra come le pietre artificiali presentino per lo più problemi legati alla presenza di depositi (causati dall'ambiente inquinato in cui si trovano le decorazioni), distacchi e macchie. Inoltre nella gran parte degli edifici analizzati le decorazioni cementizie sono state recentemente ritinteggiate, ma non sempre con vernici idonee in quanto presentano a volte distacchi dal supporto.

Tipi di degrado

Le pietre artificiali (ad eccezione di mensole e lastre di balconi) non sono soggette a forti sollecitazioni meccaniche e quindi le principali cause di degrado possono riassumersi in due categorie: quelle interne al materiale e quelle esterne legate all'ambiente circostante. Tra le principali alterazioni dovute a fattori interni ci sono: difetti di progettazione o di esecuzione, impasti sbagliati, fessurazioni e distacchi, polverizzazione, porosità eccessive, presenza nel cemento di sali solubili, mancanza di parti di conglomerato (dovute alla presenza di armature non sufficientemente annegate nel getto od in sovrannumero rispetto alle reali necessità), formazioni di vespai a causa di un'errata miscelazione dell'impasto caratterizzata da una tecnica di posa manuale o

Cause interne

⁶⁹ Come riporta Vittorio Giola in (85) a seguito della campagna di rilevamento da lui condotta sono pochi gli elementi degradati. Le forme di degrado più diffuse sono i depositi (42%) mentre meno frequenti sono le patologie gravi come la disgregazione (12%), la fessurazione (7%) ed i distacchi (2%). Presenti anche macchie (18%), mancanze (5%), graffi (4%). La predominanza dei depositi è correlabile alla particolare conformazione complessa e posizione degli elementi decorativi.

con rudimentali mescolatori non ancora completamente perfezionati. Per quanto riguarda gli impasti bisogna ricordare la forte sperimentazione eseguita nei primi anni di applicazione, che portava a volte a dei risultati non sempre soddisfacenti.

Le fessurazioni e le screpolature erano causate dalla formazione di uno strato superficiale ricco in cemento e scarso in aggregati molto sottile e resistente⁷⁰, oppure da una errata stagionatura soprattutto quando l'oggetto veniva esposto alle correnti d'aria dopo la rimozione dallo stampo. A causa delle contrazioni che si verificano durante la presa e a causa dei diversi tempi di presa tra lo strato interno e quello esterno, si generavano tensioni che portavano alla frattura superficiale. Altri fattori che influivano sulla comparsa delle fessurazioni erano: il dosaggio di cemento, dissesti statici, ritiro per evaporazione dell'acqua contenuta nell'impasto, variazioni termiche causate dal calore di idratazione, cicli di gelo-disgelo, formazione di minerali espansivi.

La polverizzazione superficiale poteva essere causata da diversi fattori: sabbia tenera o con presenza di sostanze estranee, magrezza dell'impasto, errato rimescolamento, tempi eccessivi tra la preparazione dell'impasto e la sua lavorazione. L'olio di lino e la pittura erano rimedi non risolutivi in quanto il primo provocava un cambiamento di colore al getto, mentre il secondo non riusciva ad aderire al supporto.

Una porosità eccessiva era dovuta essenzialmente all'uso di stampi non assorbenti (come quelli di metallo), poiché non riuscivano ad assorbire le gocce d'acqua venute in superficie durante la presa. Il contatto con l'acqua e la successiva evaporazione causavano efflorescenze che venivano contrastate con l'aggiunta di acqua di colla (ovvero una soluzione di colla sciolta a bagnomaria e acqua in rapporto 1:3) all'impasto attraverso bagnature regolari (45).

*Cause
esterne*

Tra le cause esterne ci sono tutti gli attacchi legati all'ambiente di natura chimica (dilavamento ed erosione), fisico-meccanica (distacchi e crepe) e biologica (muffe,

⁷⁰ Riporta *Il cemento* nel 1907: «Ricerche ed esperienze pratiche non lasciano dubbio sul fatto che nel calcestruzzo bagnato una porzione delle particelle più fini del cemento siano portate alla superficie per azione dell'eccesso di acqua assorbita mano a mano dall'atmosfera. Queste particelle, depositate alla superficie, vi formano una malta più ricca di quella contenuta nell'interno, anzi, sotto certe condizioni, esse formano qualche volta un vero intonaco di cemento puro. Ora tanto il cemento puro quanto le malte molto ricche sono soggette alle screpolature più delle malte contenenti una grande proporzione di sabbia e ghiaietta; e ciò è praticamente dimostrato dalla fabbricazione delle pietre artificiali. Inoltre è stato riconosciuto da qualche tempo che le screpolature aumentano coll'aumentare della quantità di acqua adoperata nell'impasto, e infatti più grande è tale quantità e più grande sarà la quantità di cemento che, per l'assorbimento atmosferico, verrà trasportata alla superficie. Ma la proporzione d'acqua non può essere diminuita oltre un certo limite senza compromettere la buona riuscita dell'opera, e quindi, a difendere l'uso del calcestruzzo asciutto non basta il fatto che le fessure capillari sono con esso quasi evitate» (64).

Figura 84). Ambienti particolarmente aggressivi sono quelli costieri per la vicinanza al mare (e quindi ai cloruri) e gli ambienti urbani (per l'inquinamento atmosferico) (86, 87, 88).



Figura 84 Patina biologica ed alcune piccole fessurazioni nel basamento della recinzione del villino in viale Trento e Trieste 26 angolo viale Cesare Battisti, Riccione.

Tra le cause di degrado esterne la più frequente è l'inquinamento atmosferico che genera depositi e croste soprattutto se la superficie è ruvida a seguito dei trattamenti superficiali⁷¹ (Figura 89). La deposizione del particolato atmosferico può avvenire attraverso i meccanismi della deposizione secca e della deposizione umida.

In ambienti inquinati il principale meccanismo di deposizione di SO₂ è la deposizione secca. La deposizione secca consiste nell'accumulo in superficie delle sostanze inquinanti che sono trasportate dal vento o da altre turbolenze. Il meccanismo di trasporto dipende dalle dimensioni delle particelle, ad esempio, per quelle più piccole di 0,1 µm il movimento più significativo è la diffusione molecolare (moto Browniano). Per queste particelle la superficie di una parete è il ricettacolo ideale, in quanto dopo averle

⁷¹ Riporta *Il cemento* nel 1910: «Si comprende che il rendere ruvida una superficie di cemento facilita l'agglomerazione d'immondizia e delle polveri sollevata nelle vie su di essa, assai più facilmente che se la superficie è liscia e densa. Però siccome l'immondizia e la polvere sono in genere del colore del cemento stesso, ciò non produce un cambiamento sensibile, e queste finissime particelle possono collocarsi nei pori del calcestruzzo contribuendo in tal modo a renderlo ancor più impermeabile. Là soltanto ove il fumo esce in quantità considerevole la lisciatura della superficie permette di resistere al cambiamento di colore» (56). In passato quindi la formazione di depositi sulla superficie a causa della rugosità della superficie non era considerata un difetto.

catturate le trattiene attraverso le forze di Van der Waals. La cattura di particelle fini è però ostacolata dallo strato laminare adiacente la superficie a causa del fatto che la diffusione Browniana è troppo lenta. Le particelle di diametro maggiore a 20 µm sono invece depositate attraverso assestamento gravitazionale quando l'aria non è in movimento o attraverso l'impatto inerziale quando c'è vento. L'efficienza della cattura dipende dalla forma e dalla struttura della superficie nel punto di impatto (se la superficie è ruvida, la barriera dello strato quasi laminare è attraversata più facilmente). Inoltre se le particelle e la superficie presentano una carica elettrostatica la deposizione è ulteriormente favorita. La dimensione del particolato influenza anche la velocità di deposizione, le particelle più grandi sono depositate più lentamente di quelle fini, ad esempio, per particelle di 0,01 µm e 1,0 µm, la diffusione Browniana deposita lo stesso numero di particelle rispettivamente in 1 secondo ed in 3 ore. In assenza di vento rimangono comunque altri due meccanismi che facilitano la deposizione: in presenza di un gradiente di temperatura il particolato è trasportato nella direzione opposta alla quantità di moto delle molecole di gas, mentre in presenza di un gradiente di concentrazione di vapore acqueo tra la superficie e l'aria circostante, il trasporto di gas e di particolato può avvenire attraverso l'evaporazione da una superficie umida (con l'allontanamento positivo del particolato) o attraverso la condensa (con ulteriore avvicinamento del particolato verso la superficie, effetto Stefan) (89).

La deposizione umida comprende invece l'incorporazione delle sostanze inquinanti nelle gocce d'acqua all'interno delle nuvole con conseguente formazione di piogge acide che degradano la superficie contenendo acido solforico (H_2SO_4) particolarmente aggressivo. Quando le concentrazioni di inquinanti nell'aria sono alte, sia la deposizione secca che quella umida sono maggiori. Questo vale in particolare per il primo tipo, in quanto legato al quantitativo di particolato presente in prossimità della superficie. La deposizione secca è più lenta ma al tempo stesso è continua. Le precipitazioni restano comunque potenzialmente pericolose in quanto, sebbene allontanino le particelle che si sono depositate sulle pareti, con la formazione di gradienti di temperatura e di umidità vicino la superficie si facilita la deposizione di altro particolato. Inoltre il sottile strato d'acqua formatosi in superficie è molto nocivo poiché presenta una concentrazione di inquinanti molto alta che può restare a contatto con la superficie per molto tempo. Durante tutto il periodo in cui la parete resta umida le soluzioni acide riescono inoltre a penetrare in profondità (a seconda della porosità della malta) con conseguente cristallizzazioni di sali durante l'evaporazione dell'acqua nelle ore più calde (89).

Le zone non esposte al dilavamento presentano dunque croste nere e depositi, mentre quelle esposte all'azione degli agenti atmosferici presentano un'erosione superficiale maggiore nei punti di raccordo tra i diversi elementi. L'atmosfera particolarmente inquinata genera anche lo sfaldamento delle pietre artificiali, accelerando i fenomeni di invecchiamento. Anche un ambiente aggressivo con presenza di acqua salata, ricca di solfato di calcio e magnesio (come nelle zone vicino al mare) è causa di degrado del cemento, oltre che di corrosione di eventuali armature in acciaio (86, 87, 88).

Le croste nere vengono prodotte per solfatazione, cioè per reazione tra l'acido solforico derivante dalla deposizione umida ed il calcare, con formazione di gesso (solfato di calcio, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) che, a causa dell'inglobamento delle sostanze inquinanti presenti in atmosfera (particolato), genera croste di colore grigio scuro-nero più o meno compatte e aderenti al supporto. La formazione di gesso causa anche un aumento di volume (circa il 20%) con conseguente disgregazione superficiale del paramento. Va inoltre sottolineato che ad essere attaccato è sia la fase legante che l'eventuale aggregato calcareo presente nella malta.



Figura 85 Particolare del decoro floreale sopra i pilastri del cancello con depositi, Villa Amalia, viale Cavour 194, Ferrara, Ciro Contini, 1905.



Figura 86 Particolare di un decoro floreale con depositi del villino in via Audinot 9, Bologna, Paolo Sironi, 1905.



Figura 87 A destra depositi nel muretto di recinzione, a sinistra il muretto tinteggiato. Villino Ruggeri, prospetto nord, piazzale della Libertà, Pesaro, Giuseppe Brega, 1902-1907.



Figura 88 Particolare del decoro floreale con depositi sopra la finestra nel prospetto est del villino in via Audinot 9, Bologna, Paolo Sironi, 1905.



Figura 89 Particolare del decoro floreale con depositi sopra la finestra nel prospetto sud del villino in via Audinot 9, Bologna, Paolo Sironi, 1905.

I cicli di gelo disgelo determinano la formazione di microfratture che col passare del tempo diventano sempre più profonde ed estese. La quantità e la localizzazione dei siti di nucleazione è funzione dello stato dell'acqua nella pasta di cemento idratata. L'acqua libera contenuta nei pori capillari è considerata geliva e si trasforma in ghiaccio ad una temperatura che dipende dalle dimensioni del poro: più è piccolo e più la temperatura di fusione del ghiaccio è bassa. Nel caso di acqua strutturata contenuta nei pori di qualche nanometro (pori di C-S-H), la temperatura di cristallizzazione è di -78°C , in pratica non è geliva. Le paste aventi un basso rapporto a/c contengono una proporzione minore di acqua geliva perché il reticolo poroso è costituito da pori più fini⁷². Descrivendo il meccanismo che porta alla formazione di ghiaccio è bene fare alcune considerazioni (90):

- congelando, l'acqua aumenta il proprio volume del 9% anche se non è questa la causa principale del degrado nel calcestruzzo;
- la termodinamica mostra che sotto l'effetto di un raffreddamento sufficientemente lento affinché sia in ciascun istante prossimo all'equilibrio, il ghiaccio si forma all'esterno dei corpi porosi. La conseguenza è una contrazione di questi corpi porosi, legata ad una espulsione d'acqua;
- l'aumento di volume del calcestruzzo non è legato direttamente all'abbassamento della temperatura sotto 0°C , ma alla velocità con la quale questo abbassamento si produce.

I modelli che spiegano come si arrivi alla formazione di microfessure a seguito dei cicli di gelo-disgelo sono due: il modello delle pressioni idrauliche (Powers, 1949)⁷³ ed il

⁷² L'acqua evaporabile è l'acqua contenuta nei pori capillari e nei pori di gel di C-S-H. Il rapporto d'acqua geliva (acqua geliva/acqua evaporabile) nella pasta di cemento è funzione del rapporto a/c, ad esempio ad una temperatura di -55°C la proporzione di acqua geliva passa da circa l'80% per un rapporto a/c di 0,60 a circa il 60% per un rapporto a/c di 0,35 (90).

⁷³ Dal momento in cui l'acqua comincia a gelare nei pori di un capillare, il suo volume aumenta del 9% e l'acqua in eccesso è espulsa. Dall'abbassamento della temperatura, la formazione di ghiaccio è graduale a causa della presenza di ioni disciolti nella soluzione interstiziale. La velocità di raffreddamento determina la quantità d'acqua spinta verso l'esterno del poro sotto l'effetto dell'espansione del ghiaccio. Si stabilisce quindi una pressione idraulica che è funzione della resistenza allo scorrimento. Quest'ultima dipende dalla lunghezza del tragitto e dalla permeabilità della pasta situata tra il poro che gela ed un vuoto che può accettare l'acqua che ne viene spinta dentro. Powers, applicando la legge di Darcy, ha calcolato la distanza massima che l'acqua può percorrere senza che la pressione generata superi la resistenza a trazione della pasta (L_{\max}).

$L_{\max} = K\sigma_t/UR$ dove: K è il coefficiente di permeabilità della pasta di cemento, σ_t è la resistenza a trazione della pasta, U la quantità d'acqua geliva quando la temperatura si abbassa a 1°C , R la velocità di raffreddamento.

modello delle pressioni osmotiche (Powers ed Helmuth, 1953)⁷⁴. Il modello delle pressioni idrauliche calcola la distanza massima che l'acqua può percorrere senza superare la resistenza a trazione della pasta. Infatti dopo il congelamento l'acqua in eccesso all'interno del poro viene espulsa. Il modello delle pressioni osmotiche spiega invece come a seguito della formazione di ghiaccio si creino delle pressioni osmotiche tra i pori, che generano afflussi d'acqua dai pori piccoli a quelli più grandi.

*Sali
solubili*

La cristallizzazione dei sali solubili (le cui fonti sono principalmente la salsedine marina, l'acqua di mare, i sali usati sulle strade) si manifesta a seguito dell'evaporazione della soluzione acquosa contenente i sali. Col tempo la soluzione può raggiungere la saturazione e per la diminuzione della temperatura, o per evaporazione dell'acqua, o per la combinazione dei due fenomeni, la soluzione può diventare sovrassatura con cristallizzazione del sale generando così efflorescenze in superficie (Figura 90) o sub-efflorescenze (nella struttura porosa).

*Erosione e
distacco
del
copriferro*

L'erosione si manifesta a seguito della dissoluzione e dell'asportazione del legante in quanto l'acqua piovana (soprattutto se resa più acida dall'inquinamento) dissolve il carbonato di calcio (CaCO_3) trasformandolo in bicarbonato di calcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) che essendo un sale molto solubile viene allontanato con conseguente perdita di materiale. A seguito dell'evaporazione dell'acqua il bicarbonato di calcio riprecipita in carbonato di calcio lasciando sulla superficie dei veli biancastri dovuti al trasporto del carbonato di calcio prima dissolto e poi riprecipitato sulla superficie. L'erosione si rileva soprattutto nelle zone maggiormente esposte alle precipitazioni come fregi decorati, timpani e

Questa formula mostra che L_{max} è tanto più piccola quanto più rapido è il raffreddamento. Se la distanza da percorrere è superiore ad L_{max} , la pressione idraulica supera la resistenza a trazione della pasta che si fessura (90).

⁷⁴ La soluzione interstiziale di un poro gela a temperature tanto più basse quanto più è fine il poro. Ne risulta che l'acqua gela prima nei grossi capillari. La formazione di ghiaccio in un grosso capillare genera un aumento della concentrazione ionica della soluzione non gelata in equilibrio con il cristallo di ghiaccio. La soluzione interstiziale dei pori vicini, dal momento che sono più piccoli, non ha ancora gelato. Conseguentemente, la concentrazione ionica della soluzione interstiziale dei pori piccoli non è aumentata ed è largamente inferiore a quella dei pori grossi. Questo crea un afflusso d'acqua dai pori piccoli verso quelli più grandi seguendo le leggi dell'osmosi. Questi trasporti, che si effettuano in percorsi già saturati, creano delle pressioni osmotiche. Inoltre quando l'acqua arriva nei pori grossi, la concentrazione della soluzione diminuisce permettendo la formazione di ghiaccio supplementare. Anche qui se le pressioni superano la resistenza a trazione della pasta, questa si fessura. Il ruolo delle bolle d'aria è di entrare in competizione con i pori più grandi dove il ghiaccio si è formato. In ragione della loro grande taglia, il ghiaccio si forma molto presto quando la temperatura scende sotto 0°C. Inoltre dato che il ghiaccio è costituito di acqua pura e la soluzione non gelata sulle pareti della bolla è diventata più concentrata in ioni, quest'ultima attira acqua dai pori più piccoli. Se le bolle sono sufficientemente vicine, offrono una buona protezione contro il gelo dal momento che possono accogliere l'acqua che arriva senza creare delle costrizioni troppo importanti (90).

davanzali. La carbonatazione riduce il pH del calcestruzzo (normalmente 12,5 – 13,5) influenzando negativamente sulla protezione dei ferri che potrebbero non risultare più passivati. La corrosione del ferro che si può innescare a seguito dell'abbassamento del pH porta alla formazione di ossidi di ferro (ruggine) e ad un aumento di volume che causa l'espulsione del copriferro, facilitando il processo di corrosione (Figura 90 - Figura 92).

Le superfici dei decori in pietra artificiale a volte presentano macchie di colore bianco o rossiccio che non permettono di ottenere un effetto uniforme. Le macchie di ruggine sono dovute alla presenza di ferri d'armatura arrugginiti (come perni, zanche, ecc.), mentre le macchie di colore verdastro sono collegate alla presenza di umidità sulla superficie che favorisce lo sviluppo di microrganismi che trovano nel cemento un substrato adatto alla loro crescita, tali microrganismi possono causare anche micro e macro-fessurazioni in seguito allo sviluppo delle loro strutture di radicamento (radici, ife, ecc.). Le macchie potevano essere causate anche da un dilavamento differenziato dovuto ai rilievi e alla conformazione dei decori mentre la perdita di colorazione negli elementi in pietra artificiali poteva essere a volte causata dalla rimozione dei graffiti con l'idropulitrice (87).

Nel dopoguerra sono stati eseguiti diversi interventi per il risarcimento di alcune lesioni a seguito dei danni bellici subiti dagli edifici. Tali lavori spesso non rispettano però l'originale intento mimetico, in quanto al più venivano utilizzati impasti di cemento fluido miscelati con graniglia di pietra macinata dello stesso tipo di quella da risarcire. Queste integrazioni di colore leggermente diverso sono riconoscibili nella facciata anche a causa di una lavorazione superficiale più grossolana (Figura 93 - Figura 94) (1). Tutt'oggi la malta utilizzata nelle reintegrazioni è a base di sabbia e cemento ed il metodo di posa segue le indicazioni degli interventi di recupero del calcestruzzo, con conseguenti problemi di compatibilità con il supporto. Il prodotto ottenuto con un impasto di sabbia e cemento risulta diverso dall'originale, anche perché spesso non riesce a coprire la grande varietà di ricette utilizzate nei primi anni del Novecento come visto precedentemente (cap. 1.3). Per rendere esteticamente omogeneo il manufatto si usano a volte pitture coprenti che nascondono le lavorazioni superficiali, con l'unico vantaggio di ridurre drasticamente il costo. Un ulteriore tentativo di semplificazione oltre a quelli già citati è la riproduzione di manufatti originariamente composti in più pezzi con un pezzo unico. Tale semplificazione può risultare dannosa in quanto i giunti

Macchie

*Interventi
errati*

tra i diversi pezzi permettono al sistema di dilatarsi e di muoversi, contribuendo così alla stabilità del sistema costruttivo (91, 92).



Figura 90 Particolare delle efflorescenze e del distacco del copriferro in un balconcino del villino in via Audinot 9, Bologna, Paolo Sironi, 1905.



Figura 91 Particolare del distacco del copriferro del villino Masieri-Finotti ora Ascanelli, viale Cavour 112, Ferrara, Ciro Contini, 1908.



Figura 92 Distacchi nei decori del balcone. Villa Gina, via S. Agnese 1 angolo via della Salute, Borgo Panigale, Bologna, Attilio Muggia, 1900.



Figura 93 Particolare del decoro floreale con depositi ed aggiunte nel prospetto sud del villino in via Audinot 9, Bologna, Paolo Sironi, 1905.



Figura 94 Particolare del decoro floreale, la parte più chiara si distingue dall'originale più scuro. Villino in via Audinot 9, Bologna, Paolo Sironi, 1905.

A volte per gli interventi inadeguati vi è stata la volontà di ridare all'edificio una presunta immagine originale e pulita del fabbricato, trascurando i requisiti conservativi, tecnologici ed estetici tipici del restauro. Il rischio maggiore è quello di volere svecchiare l'edificio con operazioni che risultano falsificanti o addirittura dannose, come:

- l'applicazione di pitture coprenti come quelle nei toni del grigio chiaro tipiche dell'ornato cementizio, che privano l'edificio della colorazione autentica (per questo motivo già dal 1997 la città di Torino si è dotata di un piano del Colore che vieta la tinteggiatura dei cementi artistici, riconoscendone il loro valore storico ed artistico);
- l'esecuzione di sabbiature incontrollate che rischiano di rimuovere i trattamenti superficiali;
- la realizzazione di rappezature inadeguate di lacune con leganti ed aggregati inadeguati, in contrasto con quelli originali e con problemi di compatibilità fisico-meccanica (33).

Un ulteriore rischio è l'emulazione dei recuperi male eseguiti. Infatti un edificio che appare "vecchio" in seguito ad anni di mancata manutenzione, ma con intonaci e superfici ancora ben conservati, rischia a fianco un edificio appena "ripulito" di non essere accettato dai gusti dominanti, e quindi sottoposto anch'esso ai medesimi interventi. Tra i fattori che portano ad una scarsa conoscenza di tali problematiche ci sono una assenza di tutela verso un patrimonio architettonico abbastanza recente per lo più di proprietà privata, la non conoscenza dei valori in esso presenti e la ricerca di un risparmio esasperato durante i lavori (86). A dimostrazione di ciò molto spesso accade che negli interventi su manufatti in pietra artificiale si utilizzino modalità di recupero comunemente utilizzate per altri materiali come le pietre naturali ed il calcestruzzo. Del resto nei cataloghi delle migliori ditte produttrici di materiali per il restauro non si trovano prodotti specifici per le pietre artificiali ma vi è solo un'indicazione di compatibilità anche con esse. Per questi motivi prima di ogni intervento risulta indispensabile l'attività diagnostica, sia per verificare le reali cause dell'alterazione sia per risalire alla natura del manufatto, garantendo al tempo stesso la compatibilità della malta di ripristino (86, 91).

Parte 2 - I casi di studio

2.1 Villino Pennazzi / villa Gina a Bologna

Inquadramento storico

Villa Gina (nota anche come villa Flora) è uno dei primissimi esempi di architettura floreale - Liberty a Bologna di inizio Novecento, ma attualmente è in stato di totale abbandono e degrado. Come fatto notare anche da diversi giornalisti⁷⁵ ed esperti nel settore ora Villa Gina a Borgo Panigale è un'architettura fantasma. Situata in via Sant'Agnese, è stata residenza del conte Pennazzi ed ha attraversato svariate vicissitudini passando da un proprietario all'altro fino all'attuale stato di abbandono (Figura 95). Vetri e serramenti rotti, giardino incolto, pezzi di cornicioni staccati per terra, decorazioni pittoriche scomparse, depositi e lacune: è lo spettro che oggi si presenta a chi la vuole visitare, esempio di una delle tante storie del patrimonio artistico italiano dimenticato. I progetti, almeno da parte del Quartiere non mancano, ma la burocrazia ha bloccato ogni cosa (93).



Figura 95 Villa Gina, via S.Agnese 1 angolo via della Salute, Borgo Panigale (Bologna), Attilio Muggia, 1900.

Il terreno su cui sorge la villa fino all'arrivo di Napoleone era un podere di poco più di 15 tornature con un piccolo fabbricato, in parte rustico ed in parte padronale,

⁷⁵ A tal proposito si rimanda ai seguenti articoli: Francesco Merini, Gli splendori liberty di primo Novecento in totale abbandono, Corriere di Bologna, giovedì 25 ottobre 2007, pag.17; Paola Naldi, Il fantasma Liberty, Repubblica – sezione Bologna, 3 giugno 2009, pag. 11.

appartenente alle monache del Monastero dei Santi Naborre e Felice di Bologna. Con la soppressione delle corporazioni religiose emanata da Napoleone e la vendita dei loro fondi rustici il terreno fu messo all'asta ed acquistato da Pasquino Caprara. I proprietari successivi furono (in ordine): Giuseppe Spaggiari, Giuseppe Mazzanti, Giuseppe Sebastiano Galli ed il figlio, il canonico don Giacomo Galli. Quest'ultimo dopo la morte avvenuta nell'ottobre 1845 lasciò tutti i suoi beni a Pietro Roberti, padre di Giovanni Battista suo "figlioccio di battesimo". Ricominciano così i continui passaggi di proprietà: l'ingegnere modenese Stefano Barale (che subentra nel 1864), Raffaele Melloni (1868), il fratello Luigi Melloni (1878), il figlio Alessandro Melloni (1887), Virginia del defunto Celso Lisi (1897), Cosimo Pennazzi (1900).

Cosimo Pennazzi era un nobile residente ad Alessandria d'Egitto (indicato anche con il titolo di "Bey" che nell'Impero Ottomano corrispondeva ad un principe vassallo) ed un avvocato specializzato in contenziosi internazionali. Probabilmente decise di risiedere a Borgo Panigale a seguito di una relazione con Virginia Lisi indicata nei documenti catastali del 1912 come sua moglie. Il conte fece demolire i fabbricati esistenti e fece costruire ad Attilio Muggia⁷⁶ la villa oggetto di studio chiamandola villa Gina (Figura 96, Figura 97). L'edificio presentava un impianto interno del tutto tradizionale ma con ornamenti esterni originalissimi e di grande impatto visivo che si basavano sul tema floreale con richiami all'architettura egiziana (come nei disegni delle palme) (96).

⁷⁶ Attilio Muggia (Venezia 2 aprile 1860 – Bologna 18 febbraio 1936). Si laureò a Bologna in Ingegneria Civile con indirizzo architettonico nel 1885. Ottenne nel 1891 la libera docenza in Architettura tecnica e dal 1897 anche quella di Costruzioni civili, finché nel 1912 divenne professore stabile alla cattedra di Architettura tecnica, che mantenne fino al 1935 quando lasciò l'insegnamento per raggiunti limiti di età. Riformatore dell'ordinamento della Scuola di Ingegneria e fondatore della Scuola di Chimica industriale (1916), fu circondato da allievi quali Giuseppe Vaccaro, Enrico De Angelis, Pier Luigi Nervi, suo diretto collaboratore ed assistente per dieci anni nella Società costruzioni cementizie. Egli si occupò di tutti i diversi rami dell'ingegneria civile realizzando opere di tipo architettonico, idraulico, strutturale ed industriale, diventando il pioniere del cemento armato. Tra le sue opere: la scalea della Montagnola (1890), i palazzi Maccaferri (1896) e Bacigalupo (1898) in via Indipendenza, la partecipazione ai concorsi per il Tempio israelitico di Roma (1890) e per il museo del Cairo (1895), ed in seguito, il progetto strutturale e la costruzione della biblioteca Nazionale di Firenze (1910) e le gradinate del teatro della Pergola a Firenze (1910), le officine Galileo a Rifredi, la sede del Banco di Napoli a Bologna (1925), quella della Cassa di Risparmio di Pesaro ed il Tempio israelitico di Bologna (1926). Nel 1927 fu chiamato a rappresentare l'Italia a Ginevra nella commissione del concorso per il palazzo della Società delle nazioni. Egli si dedicò anche all'affermazione in Italia del cemento armato come tecnica costruttiva importando nel 1896 il sistema Hennebique ed introducendolo ufficialmente nell'insegnamento universitario delle Costruzioni civili. Queste conoscenze tecniche gli permisero per molti anni di essere tra i pochi ingegneri in grado di realizzare grandi manufatti in cemento armato come il ponte sul Magra (nel 1905 a Caprioliola lungo 300 m ad archi ribassati) e di essere nominato membro della commissione che stilò le prime norme sulle costruzioni in cemento armato in Italia. Fu direttore generale della Società costruzioni cementizie (con sedi a Bologna e Firenze) dal 1905 al 1925 (94, 95).



Figura 96 Progetto di Villa Gina, via S.Agnese 1 angolo via della Salute, Borgo Panigale (Bologna), Attilio Muggia, 1900. China e acquerello su cartoncino. Archivio Muggia, fondo privato, Sezione di architettura, Università di Bologna.



Figura 97 Disegno prospettico nel progetto originale. Villa Gina, via S.Agnese 1 angolo via della Salute, Borgo Panigale (Bologna), Attilio Muggia, 1900 (97).

Il tema della villa di soggiorno campestre viene qui sviluppato nella sua accezione più tradizionale attraverso un salone passante su cui prospettano tutti gli ambienti. Tale soluzione si rispecchia anche nei prospetti in quanto il corpo centrale del salone emergeva isolato e circondato da terrazze che oggi sono state sostituite da superfetazioni. L'influenza del committente è visibile nelle decorazioni con ricchi temi ornamentali, dove tra le fasce marcapiano, pilastri che sorreggono vasi per piante esotiche e cornici (Figura 98 - Figura 99), si dipartono palme, lunghi steli di papiri, corolle di fiori (Figura 100 - Figura 103) ed altri motivi floreali (98). Richiami all'Egitto

si ritrovano anche nel raccordo curvilineo e decorato del sottotetto, nelle conclusioni delle lesene d'angolo e delle altre che segnalano sulla facciata la divisione interna degli ambienti. Nel complesso la villa è il risultato di un prodotto decorativo che si può collocare nel periodo di un eclettismo complicato da influenze liberteggianti che in questo caso si rifanno al repertorio botanico orientale (99). I piani sono distinti a seconda della destinazione d'uso: i primi due sono riservati alla residenza mentre il secondo alla servitù ed alla galleria con i terrazzi⁷⁷.



Figura 98 Disegno del decoro floreale del fregio al primo piano. Villa Gina in via S. Agnese 1 angolo via della Salute, Borgo Panigale (Bologna), Attilio Muggia, 1900. Archivio Muggia, Biblioteca Ordine degli architetti di Bologna, via Saragozza 175, Bologna.



Figura 99 Decoro floreale del fregio al primo piano. Villa Gina in via S. Agnese 1 angolo via della Salute, Borgo Panigale (Bologna), Attilio Muggia, 1900.

⁷⁷ «I tre piani sono destinati, due all'abitazione padronale, il terzo ai locali per i domestici e ad una grande galleria. Il piano terreno comprende: la grande sala centrale alla quale si innesta la tromba della scala a giorno; il salotto da pranzo, la cucina, la dispensa, il salotto da ricevere e lo studio e lo studio, oltre ad un ingresso di servizio dal fianco. Gli ingressi principali sono: l'uno sulla fronte di mezzogiorno, da un portico o loggia accessibile alle carrozze per la discesa a coperto; l'altro sulla fronte di tramontana. La scala principale che, come si è detto, fa parte della sala, è in marmo di Verona, ha il parapetto ad ornati di ferro battuto e riceve luce da un alto finestrone chiusi da vetri Falconnier (dei quali costituisce la prima applicazione fattane in Italia). Essa scala porta alla loggia del primo piano, la quale occupa due terzi di quella terrena, essendone la parte rimanente occupata dalla camera da letto matrimoniale. Attigua a questa trovasi la camera da toilette con bagno e latrina. Gli altri locali sono destinati pure a camere da letto e guardaroba. Dalla camera da letto matrimoniale si accede all'ampia terrazza sopra il portico della facciata. Il terzo piano è limitato al corpo centrale ed alla parte posteriore della Villa; esso contiene le camere per i domestici e la galleria belvedere, destinata a guardaroba. Una scaletta di servizio attigua alla cucina disimpegna i due piani superiori e dà accesso anche al sotterraneo destinato a cantina» (97).



Figura 100 Disegno del decoro floreale della finestra al primo piano. Villa Gina in via S.Agnese 1 angolo via della Salute, Borgo Panigale (Bologna), Attilio Muggia, 1900. Archivio Muggia, Biblioteca Ordine degli architetti di Bologna, via Saragozza 175, Bologna.



Figura 101 Finestra al primo piano. Villa Gina in via S.Agnese 1 angolo via della Salute, Borgo Panigale (Bologna), Attilio Muggia, 1900.



Figura 102 Disegno del decoro floreale del balcone. Villa Gina in via S.Agnese 1 angolo via della Salute, Borgo Panigale (Bologna), Attilio Muggia, 1900. Archivio Muggia, Biblioteca Ordine degli architetti di Bologna, via Saragozza 175, Bologna.



Figura 103 Balcone con decori in ferro battuto. Villa Gina in via S.Agnese 1 angolo via della Salute, Borgo Panigale (Bologna), Attilio Muggia, 1900.

Entro un sistema di rigorose simmetrie, l'impalcato strutturale in calcestruzzo armato è evidenziato all'esterno dalle lesene. I tamponamenti in laterizio erano intonacati e dipinti di rosso pompeiano. L'insieme allude evidentemente all'archeologismo del tempo e s'inserisce nella tradizione di quello «stile Muggia» che rese celebre il suo autore (100). Inoltre la villa presentava soluzioni tecnico-costruttive decisamente innovative per quei tempi, come i solai in cemento armato Hennebique⁷⁸ (Figura 104), l'asfalto ad impermeabilizzare le terrazze laterali, e originali serrande in lamiera d'acciaio alle finestre⁷⁹ (96).

⁷⁸ François Hennebique (Neuville-Saint-Vaast, 26 aprile 1842 – Parigi, 7 marzo 1921). Nel 1867 fonda l'impresa che costruisce inizialmente la propria fortuna sul restauro delle chiese gotiche del nord della Francia. La letteratura critica avanza l'ipotesi che l'attenta osservazione del sistema costruttivo archiacuto avrebbe fatto sorgere in lui l'idea che porterà dopo quindici anni di studi e di esperimenti effettuati in gran segreto, al brevetto del 1892 per la prima trave moderna in conglomerato cementizio armato con staffe e ferri piegati, pubblicizzato poi col motto: "*plus d'incendies désastreux*". A questo punto Hennebique ha un'ulteriore intuizione. Chiude l'impresa e apre uno studio tecnico punto di riferimento per gli agenti procacciatori di commesse da eseguirsi col suo brevetto e per le imprese concessionarie, responsabili attive della direzione dei cantieri. Un'intensa attività pubblicitaria e la creazione di una rivista, *Le Béton Armé*, che dal 1898 collega ed informa gli affiliati ed il pubblico dei professionisti, rendono il *système Hennebique*, pur con tutti i limiti, uno fra i più noti e praticati (101).

⁷⁹ «La costruzione della Villa ha le murature di laterizio coi paramenti ad accurata cortina; i solai di cemento armato Hennebique, i quali formano anche le terrazze coperte poi di asfalto, il tetto con travature in legno e copertura di tavelloni forati e tegole piane. Le decorazioni architettoniche sono di cemento ed hanno gli ornati floreali a rilievo colorati ad encausto. Al servizio d'acqua è provveduto mediante una pompa che la eleva dal pozzo ad un serbatoio collocato sulle scale di servizio. Le serrande esterne di porte

Qualche anno dopo il conte Pennazzi fece costruire anche un altro fabbricato di due piani con otto vani ad uso di asilo infantile. Il 25 luglio 1912 il conte ricedette l'intera proprietà a sua moglie, Virginia Lisi, che a sua volta vendette tutto al possidente Aldo Alberani nel maggio del 1913. Con questa vendita comincia un'altra serie di cambi di proprietà: Attilio Roveri acquistò l'asilo, Azzalini Menotti di Padova acquistò la villa con i fabbricati di servizio (11 luglio 1917) ceduti poi a Goffredo Piazzì (1 ottobre 1920) e alla Casa di Salute Villa delle Rose del dott. Bonola e C. con sede in Bologna (15 aprile 1921). La nuova società trasformò la villa in casa di salute e costruì tre nuovi fabbricati. Dopo diversi cambiamenti della ragione sociale il complesso di Villa Flora divenne uno dei più importanti del territorio, garantendo inoltre una grande ricettività, che venne ulteriormente aumentata con la costruzione nel 1940 di un nuovo padiglione per infermi, una cappella (Figura 105) ed altre strutture per attività connesse alla casa di cura (Figura 106).

Nel settembre 1942 la Società Villa Flora firmava un compromesso di vendita dell'intero complesso all'Ente Nazionale di Lavoro per Ciechi con sede in Firenze. Le ragioni di tale vendita non sono note e non si conosce neanche se l'ENLC abbia mai preso possesso della villa dato che l'Italia era nel pieno della Seconda Guerra Mondiale. Nel 1945 nella villa e negli altri locali trovarono alloggio ben 120 famiglie di sfollati che danneggiarono il complesso, inoltre a pochi mesi dalla Liberazione, i locali furono occupati dalla Regia Aeronautica Militare che dal giugno 1945 vi insediò parte di un presidio regionale (96). Dopo la soppressione dell'ENLC (assieme ad altri enti considerati inutili) tutto il complesso è passato in proprietà al Ministero del Tesoro che recentemente (luglio 2009) ha ceduto la villa assieme ad altre proprietà provenienti da enti dismessi alla società Fintecna.

In Tabella 4 sono riportati i campioni di intonaci e pietre artificiali prelevati presso villa Gina. Nelle tavole in allegato sono indicati i punti di prelievo dei campioni nei vari prospetti e la lettura delle principali forme di degrado per i prospetti sud ed est. Sempre nelle tavole in allegato sono disponibili inoltre i rilievi geometrici, architettonici, fotografici e la ricostruzione storica della villa così come progettata da Muggia.

Campioni









Figura 105 Ex-Cappella, oggi trasformata in cabina elettrica, presso il complesso di villa Flora su via della Salute, Borgo Panigale (Bologna).



Figura 106 Una delle “ali” che costituiscono il complesso di villa Flora su via della Salute, oggi in abbandono. Borgo Panigale (Bologna).

Tabella 4 Descrizione dei campioni prelevati presso villa Gina.

<p>Campione: G1</p>  <p>Frammenti di pittura ed intonaco della finestra a sinistra dell'ingresso principale in corrispondenza del punto di connessione delle inferriate dove l'intonaco di supporto presenta forme di degrado come crepe e distacchi.</p>	<p>Campione: G10</p>  <p>Rivestimento della cornice del balcone. Il campione presenta muschi in quasi tutta la superficie e nello strato inferiore vicino al solaio. Sono presenti tracce di materiale isolante probabilmente bitume.</p>
<p>Campione: G2</p>  <p>Frammenti di malta e laterizio della zona centrale del bancale della finestra a sinistra dell'ingresso principale. In questo punto lo strato di rivestimento presenta delle discontinuità che lasciano in vista il laterizio sottostante e consentono la crescita di una lieve forma di vegetazione infestante.</p>	<p>Campione: G11</p>  <p>Rivestimento della cornice del balcone nella parte esterna.</p>
<p>Campione: G3</p>  <p>Pittura ed intonaco della finestra a sinistra dell'ingresso principale in corrispondenza della zona degradata in basso soggetta a lacune e mancanze.</p>	<p>Campione: G12</p>  <p>Parte del parapetto in pietra artificiale del balcone in corrispondenza del giunto con la ringhiera in ferro.</p>
<p>Campione: G5</p>  <p>Frammenti del rivestimento cementizio dei pilastri binati a destra del portico presente all'ingresso.</p>	<p>Campione: G14</p>  <p>Porzione del decoro in pietra artificiale presente nel balcone. Il campione è stato prelevato in corrispondenza della linea di giunzione tra le due formelle.</p>

<p>Campione: G6</p>  <p>Intonaco prelevato dagli edifici che costituiscono l'ampliamento della villa realizzato tra il 1922 ed il 1940 in corrispondenza del fronte strada su via della Salute.</p>	<p>Campione: G15</p>  <p>Porzione del decoro in pietra artificiale presente nel balcone. Il campione è stato prelevato in corrispondenza della linea di giunzione tra le due formelle.</p>
<p>Campione: G7</p>  <p>Strato di intonaco superficiale nel prospetto ovest. Il campione è caratterizzato da una forte presenza di muschi.</p>	<p>Campione: G16</p>  <p>Porzione di intonaco della casa del custode.</p>
<p>Campione: G8</p>  <p>Rivestimento del bancale della finestra alta nel prospetto ovest. La zona del prelievo presenta muschi.</p>	<p>Campione: G17</p>  <p>Rivestimento della fontana in pietra artificiale. La fontana risulta completamente ricoperta da edere, le cui radici hanno distaccato alcune parti della fontana.</p>
<p>Campione: G9</p>  <p>Strato superficiale di intonaco distaccato dalla parete del prospetto ovest. L'intonaco nella zona appare gonfiato con soluzione di continuità. Da un'analisi visiva sembra un rappezzo successivo.</p>	<p>Campione: G18</p>  <p>Rivestimento dei pilastri binati in corrispondenza dell'ingresso principale.</p>

2.2 Villa Verde a Bologna

Costruita agli inizi del '900 su antiche preesistenze, la casa di cura Villa Verde (Figura 107) accolse l'ambulatorio di Augusto Murri fino alla sua morte. Come tutti gli edifici adibiti a casa di cura, all'interno la villa ha subito nel corso del tempo diversi rifacimenti per adattare le nuove strutture alle attrezzature sanitarie ed alle esigenze ospedaliere. L'esterno ha mantenuto la recinzione in cemento a steli intrecciati e ghirlande fiorite (Figura 108 - Figura 109). La stessa decorazione, opera probabilmente del cementista Legnani, si ripete nei fascioni marcapiano, nella scala e, all'interno, nella balaustra del corridoio (98). In Tabella 5 sono descritti i campioni prelevati presso villa Verde. Nelle tavole in allegato sono indicati i punti di prelievo dei campioni di pietra artificiale lungo la balaustra su via S.Mamolo e nella scalinata principale, e lo studio delle principali forme di degrado.

Inquadramento storico

Campioni



Figura 107 Cartolina della Casa di cura Villa Verde, via S. Mamolo 45, Bologna, inizi del '900 (98).


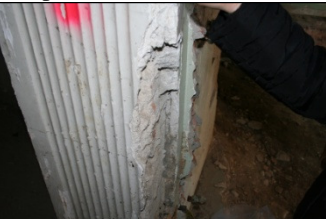











Figura 108 Stato attuale di Villa Verde, via S. Mamolo 45, Bologna, inizi del '900.



Figura 109 Decorazioni della balausta presso Villa Verde, via S. Mamolo 45, Bologna, inizi del '900.

Tabella 5 Descrizione dei campioni prelevati presso villa Verde.

<p>Campione: V1</p>  <p>Crosta di un decoro in pietra artificiale della balausta su via San Mamolo.</p>	<p>Campione: V7</p>  <p>Frammenti di gesso della cornice della porta con scanalature.</p>
<p>Campione: V2</p>  <p>Tinta di un decoro in pietra artificiale della balausta su via San Mamolo.</p>	<p>Campione: V8</p>  <p>Cornice in gesso di una finestra. Il campione presenta anche una tinteggiatura superficiale.</p>
<p>Campione: V3</p>  <p>Frammento di un decoro in pietra artificiale della balausta su via San Mamolo.</p>	<p>Campione: V9</p>  <p>Pietra artificiale della balausta curva al primo piano.</p>

<p>Campione: V4</p> 	<p>Frammento di cornice inferiore nella fascia di decori in pietra artificiale della balaustra su via San Mamolo. Il campione presenta muschi.</p>	<p>Campione: V10</p> 	<p>Corrimano della balaustra curva al primo piano.</p>
<p>Campione: V5</p> 	<p>Tinta di un decoro in pietra artificiale della balaustra su via San Mamolo. Il campione presenta anche depositi e croste.</p>	<p>Campione: V11</p> 	<p>Pietra artificiale della balaustra curva in corrispondenza dei decori.</p>
<p>Campione: V6</p> 	<p>Cordolo superiore della balaustra su via San Mamolo.</p>		

2.3 Albergo Dorando a Carpi

Inquadramento storico

Il grande albergo, voluto dai fratelli Ulpiano e Dorando Pietri sulla centralissima via Berengario, fu finanziato con le offerte ed i premi giunti al maratoneta Dorando dopo la clamorosa esclusione dalla vittoria olimpica e venne affidato all'architetto Prati che proprio in quegli anni era impegnato nel rinnovo urbano delle città di Carpi e Modena sia con progetti pubblici che privati. Di fronte all'albergo Dorando, per esempio, Prati aveva già avviato nel 1912 i lavori di ristrutturazione della Banca Popolare Cooperativa di Carpi. In anni di intensa trasformazione per la città, l'edificio voluto dai fratelli Pietri risulta essere quello più prestigioso e di maggiore entità, visto anche il ruolo urbano che gli veniva affidato. Così Prati disegna un accurato fabbricato di cui oggi rimane solo la pelle (Figura 110), dato che i consistenti interventi a cui è stato sottoposto circa quarant'anni fa hanno comportato la trasformazione di tutti locali interni, interamente affrescati e decorati con motivi floreali, ad esclusione di alcune stanze. Le decorazioni originali sono tutt'ora visibili nei soffitti di due salette al primo piano, oggi trasformate in uffici, con fasce geometriche che in corrispondenza degli angoli si allargano in quadrilateri decorati con pavoni. Le forme fantasiose degli ornati floreali e dei particolari in cemento ed i ferro battuto, conferiscono quei piacevoli ed eleganti effetti che i temi *jugendstil* hanno sempre offerto. Arturo Prati infatti si ispirò proprio al palazzo della Secessione di Vienna (1898) per disegnare le decorazioni dell'albergo Dorando, come nel motivo del ramo di mirto e di alloro dipinto o in rilievo di cemento, oppure nelle testine femminili o nei mascheroni (Figura 111). La serrata composizione delle doppie porte-finestre accoppiate e con architrave infiorato, la dettagliata definizione degli elementi di scansione verticale (come le aperture dell'ultimo piano ed il sottogronda) caratterizzano una facciata ben curata. L'assemblaggio di queste coloratissime soluzioni decorative è comunque ancorato ad un fare più eclettico che innovativo. Forse il Prati avvertito il peso del tema (un albergo in città) e vista la vicinanza agli importanti edifici rinascimentali di piazza dei Martiri (come palazzo Pio) decise di realizzare una quinta teatrale che si viene a distendere sul fianco dei celebri fabbricati. A Carpi Arturo Prati realizzò sempre per Dorando Pietri anche la sua residenza in via S. Maria in Castello 2/4, con un doppio motivo di porte e finestre binate ed un mascherone con racemi infiorati (Figura 112) (98).

Campioni

In Tabella 6 sono descritti i campioni di pietre artificiali prelevati presso l'ex albergo Dorando Pietri. Nelle tavole in allegato sono indicati inoltre i punti di prelievo dei

campioni nel prospetto principale, la lettura delle principali forme di degrado, i rilievi geometrici, architettonici e fotografici.



Figura 110 Ex albergo Dorando Pietri, via Jacopo Berengario 1, Carpi, Arturo Prati, 1911.










Figura 111 Ex albergo Dorando Pietri, via Jacopo Berengario 1, Carpi, Arturo Prati, 1911.



Figura 112 Casa Dorando Pietri, via S. Maria in Castello 2/4, Carpi, Arturo Prati, 1911.

Tabella 6 Descrizione dei campioni prelevati presso l'ex albergo Dorando Pietri.

<p>Campione: D1</p>  <p>Rivestimento in pietra artificiale di colore rosso (finto granito) nel basamento sotto la finestra al piano terra.</p>	<p>Campione: D5</p>  <p>Intonaco dietro la grondaia.</p>
<p>Campione: D2</p>  <p>Frammento di pietra artificiale della base sinistra della colonna della porta a destra (ingresso principale) con depositi.</p>	<p>Campione: D6</p>  <p>Frammento di pietra artificiale della base della colonna del balcone della finestra principale.</p>
<p>Campione: D3</p>  <p>Frammento di pietra artificiale della base della colonna destra della porta dell'ingresso principale con depositi.</p>	<p>Campione: D7</p>  <p>Frammento di pietra artificiale della parte alta della colonna sinistra del balcone principale.</p>
<p>Campione: D4</p>  <p>Frammento della prima lesena di destra.</p>	

Parte 3 – La caratterizzazione delle malte moderne

3.1 Caratterizzazione del legante nelle malte

Le fonti documentali che riguardano l'edificio (come le vecchie ricette utilizzate dagli artigiani od i documenti cantiere) sono molto importanti nel restauro delle malte storiche, in quanto possono dare informazioni sul tipo di legante o di aggregato utilizzato con le rispettive proporzioni. Anche l'anno in cui l'edificio è stato costruito può essere un utile indizio per stabilire il tipo di legante utilizzato, ma in ogni caso per caratterizzare fisicamente e chimicamente la malta oggetto di restauro sono necessarie ulteriori indagini diagnostiche in laboratorio.

Procedura di preparazione del campione

Il saggio con la fenoltaleina (concentrazione 1%) è una delle prime prove che si può eseguire in cantiere già al momento del prelievo del campione, in quanto deve essere condotta su superfici di frattura fresche per distinguere le zone carbonatate da quelle non ancora carbonatate.

I campioni devono essere prelevati in maniera da avere materiale sufficiente per eseguire le indagini diagnostiche sia nella parte carbonatata che in quella non carbonatata (se presente). In particolare le sezioni lucide preparate per le osservazioni al microscopio ottico potranno essere riutilizzate anche per le osservazioni al microscopio elettronico a scansione (SEM), mentre i campioni macinati per eseguire le diffrattometrie potranno essere riutilizzati per eseguire anche le rispettive termogravimetrie. Infine altri campioni dovranno essere preparati con superfici di frattura per ulteriori osservazioni al SEM. I campioni preparati per il SEM e per le diffrattometrie dovranno essere precedentemente seccati in stufa a 40°C fino al raggiungimento della massa costante, inoltre sui campioni per le diffrattometrie e le termogravimetrie si dovrà procedere alla separazione del legante dall'aggregato.

Nella diffrazione a raggi X (*X-ray diffraction*, XRD con anodo di rame) il campione deve essere frantumato grossolanamente senza distruggere le particelle di aggregato, successivamente l'aggregato viene separato dal legante manualmente (eseguendo un controllo al microscopio ottico) oppure tramite setacciatura. La frazione fine ottenuta (passante al setaccio da 63µm) è considerata la frazione ricca in legante (dal momento che ci saranno comunque delle contaminazioni di aggregato), mentre il trattenuto sarà la frazione ricca in aggregato. Le due frazioni devono essere infine macinate finemente.

XRD sulla frazione legante

Dal momento che la diffrazione identifica solo fasi cristalline, sulla frazione legante non sarà possibile identificare fasi amorfe, come i C-S-H prodotti durante l'indurimento di una malta idraulica. Le fasi cristalline, come i grani anidri, possono essere invece identificati se presenti in percentuali superiori al 3%, in quanto il diffrattometro identifica solo le sostanze presenti in quantità sufficienti da emergere dal rumore di fondo (102). La presenza di grani anidri può permettere di distinguere il tipo di legante. Infatti i maggiori componenti di un clinker di cemento Portland (OPC) sono: C_3S (alite, 50-70%), C_2S (belite, 15-30%), C_3A (alluminato tricalcico, 5-10%), C_4AF (brownmillerite, 5-15%). Il cemento romano (RC), prodotto a partire da marne o da una miscela di diversi elementi opportunamente dosati (come calcare ed argilla), viene cotto a temperature molto più basse di un OPC ($800^{\circ}C$ - $1100^{\circ}C$), ben al di sotto della temperatura di clinkerizzazione ($1450^{\circ}C$). Dopo la cottura il cemento romano viene raffreddato molto lentamente ed il clinker viene finemente macinato senza l'aggiunta di altri elementi (come il gesso). I maggiori componenti presenti in un clinker di cemento romano sono: C_2S (belite, 40-50%), C_2AS (gehlenite), C_3S_2 (rankinite), C_3A (alluminato tricalcico, 10-15%), C_4AF (brownmillerite 15-20%), CS (silicato monocalcico). In contrasto con l'OPC, il C_3S è assente a causa delle basse temperature di cottura (103).

La presenza di C_3S nella frazione ricca in legante può considerarsi un indicatore del fatto che il legante utilizzato sia stato un cemento Portland, mentre la presenza di C_2AS (gehlenite) indica l'utilizzo di un cemento romano. Dal momento che l'intervallo di stabilità della gehlenite è compreso tra $900^{\circ}C$ e $1150^{\circ}C$, quest'ultimo può considerarsi un indicatore delle basse temperature di cottura (tipiche del RC). Durante la produzione dell'OPC, infatti, la gehlenite si può formare come un composto intermedio ma non compare mai nel prodotto finale. Invece, nelle calce idrauliche naturali il C_2AS è ancora presente (104, 105). I diffrattogrammi di un cemento Portland e di un cemento romano sono riportati in Figura 113 ed in Figura 114. Il primo presenta C_3S e gesso, mentre il secondo presenta solo C_2S e C_2AS .

La diffrazione può identificare anche fasi idrate come la portlandite (nelle zone non carbonatate), l'ettringite ed il C_4AH_{13} . Se la struttura della malta è poco porosa, parte della portlandite presente all'interno della sezione non viene convertita in calcite in quanto la CO_2 difficilmente arriva molto in profondità, dal momento che la carbonatazione procede dalla superficie verso l'interno e che la porosità diminuisce durante questo processo.

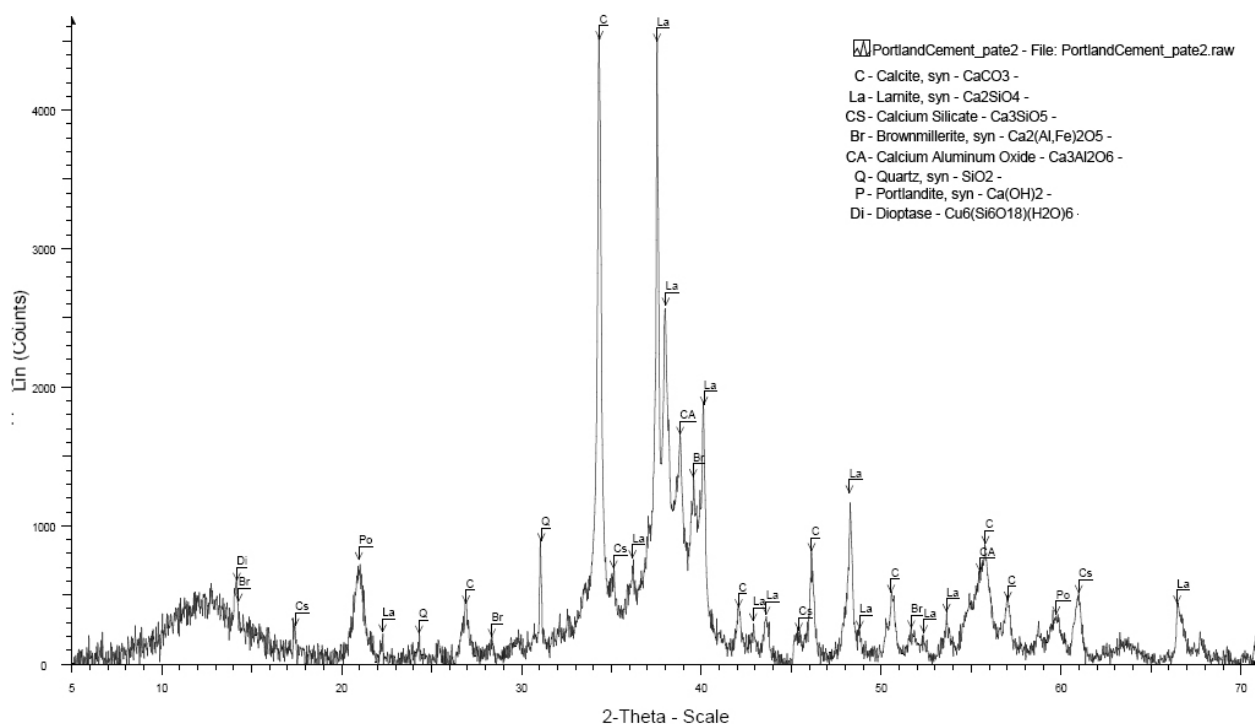


Figura 113 Diffattogramma di un cemento Portland II.

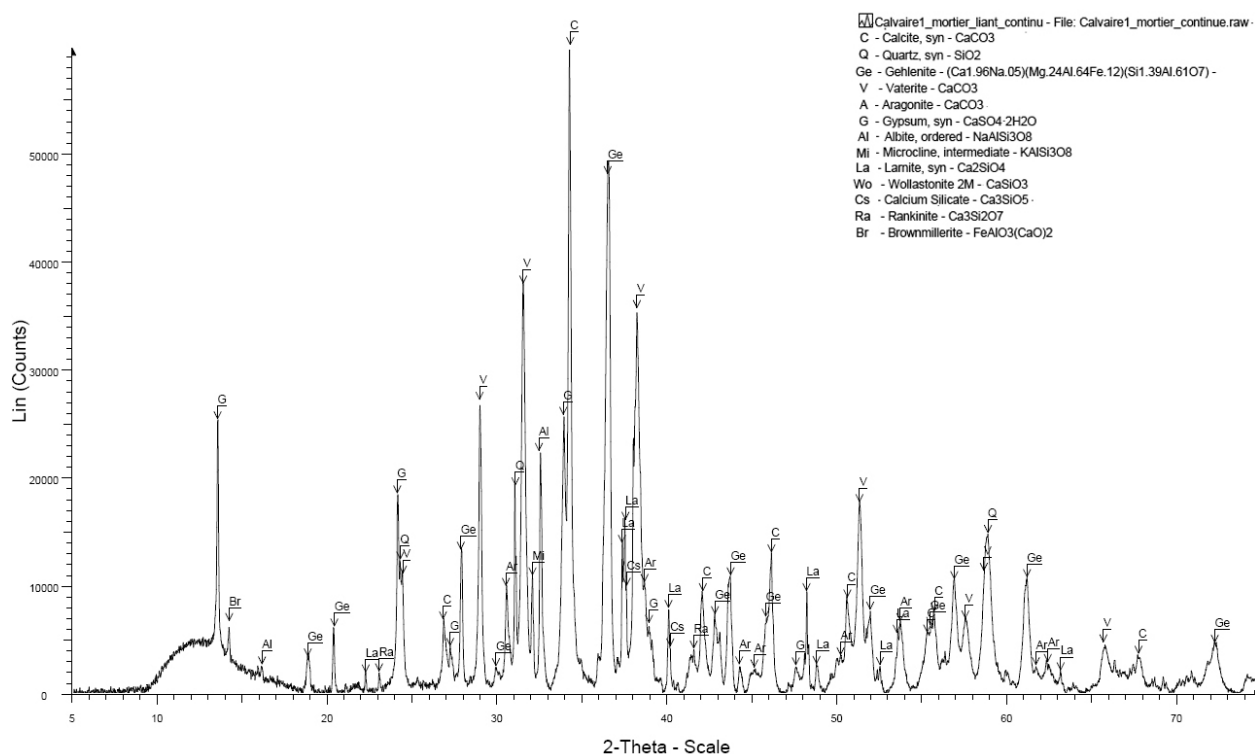


Figura 114 Diffattogramma di una malta di cemento romano (Francia, fine XIX sec).

L'ettringite si può formare a seguito di un attacco solfatico tra i prodotti di idratazione del C_3A ed il gesso⁸¹ (104, 106).

⁸¹ Il gesso viene aggiunto all'OPC come ritardante della presa che si ha a seguito della rapida idratazione del C_3A , ma può essere anche il risultato della carbonatazione dell'ettringite e del monosolfato di alluminio o di processi di solfatazione in ambiente inquinato come nel caso dei solfati presenti nell'aria

La diffrazione a raggi X è utile inoltre per distinguere i diversi tipi di cemento romano, per esempio, quello prodotto dalle marne di Lilienfeld (Austria) da quello prodotto da Vicat in Francia. Le basse temperature di cottura nel cemento di Lilienfeld portano alla formazione di β -C₂S con un basso grado di cristallinità ed alla incompleta cottura delle marne (presenza di quarzo, calcite, muscovite ed albite). I diffrattogrammi del cemento di Lilienfeld mostrano la presenza di gehlenite e tilleyite Ca₅Si₂O₇(CO₃)₂, mentre nei cementi francesi è stata individuata la spurrite Ca₅(SiO₄)₂(CO₃), una forma carbonatata di C₂S, che nei cementi di Lilienfeld è stata identificata solo in tracce. Inoltre il cemento Vicat mostra una composizione ricca in alluminati (C₁₂A₇, C₃A, C₄AF e Ca₄Al₆(SO₄)O₁₂) mentre le principali fasi con silicati sono la belite e la spurrite. Il cemento Vicat contiene anche un maggiore quantitativo di solfati cristallizzati in forma di anidrite (CaSO₄) e ye'elimita (Ca₄Al₆(SO₄)O₁₂) a causa di una maggiore presenza di minerali con solfati nelle marne utilizzate (come la pirite) (107).

TG – DTA - DSC Tra la analisi termiche si possono distinguere tre tecniche: la termogravimetria (TG), l'analisi termica differenziale (*Differential Thermal Analysis*, DTA) e la calorimetria differenziale a scansione (*Differential Scanning Calorimetry*, DSC). La termogravimetria misura la perdita di peso in un campione durante il suo riscaldamento. La DTA misura la differenza di temperatura tra il campione ed un inerte di tipo standard che viene riscaldato nello stesso tempo e modo. La DSC misura l'energia necessaria per mantenere il campione ed il materiale di riferimento alla stessa temperatura. Le analisi termiche danno informazioni sulle trasformazioni fisiche di un campione durante il riscaldamento in condizioni controllate, e possono identificare non solo le fasi cristalline, ma anche quelle amorfe come i C-S-H (Tabella 7). L'identificazione di fasi minerali però può essere difficoltosa a causa di temperature di decomposizione simili tra loro (per esempio l'acqua persa dai C-S-H e l'argilla; la portlandite e la magnesite a 520°C) (102).

(SO_x). La presenza di gesso può dunque indicare sia la presenza di forme di degrado legato all'inquinamento atmosferico che la presenza di un cemento Portland. In questo caso ulteriori analisi al SEM permetteranno di distinguere meglio tra le due possibilità.

Tabella 7 Temperature tipiche di dissociazione dei leganti comuni ed altri materiali presenti nelle malte (102, 105, 108).

CaCO ₃	650-890°C (per l'aragonite 470°C)
Ca(OH) ₂	400-520°C
MgCO ₃	450-520°C
Mg(OH) ₂	350-420°C
Ca ₃ SiO ₅	1425°C (fase di transizione solo per DSC o DTA)
Ca ₂ SiO ₄	693°C (fase di transizione solo per DSC o DTA)
CaSO ₄ ·2H ₂ O	45-120°C
Ettringite	125-135°C
C-A-S-H	520-600°C
C ₂ AH ₈	175-185°C
C ₄ AH ₁₃	190-250°C
C ₃ AH ₆	280-320°C
Minerali argillosi (caolinite, illite, smectite)	500-650°C
Sostanze organiche	300-500°C (utilizzate come additivi per migliorare la lavorabilità, il tempo di presa e la durabilità delle malte)

Secondo alcuni autori è possibile anche distinguere i carbonati grazie ai loro picchi endotermici. La calcite ne presenta uno a circa 840°C, la dolomite ne presenta due a circa 780°C e 860°C, mentre il CaCO₃ formatosi a seguito della carbonatazione presenta perdite di peso attorno a 750°C. La posizione dei picchi può variare a seconda delle dimensioni del grano e del tipo di atmosfera (azoto, ossigeno, aria). E' possibile ottenere anche la percentuale di CaCO₃ calcolando la perdita di peso dovuta alla CO₂ attraverso un calcolo stechiometrico e successivamente calcolare il rapporto calce/aggregati. In ogni caso questo è possibile solo se il carbonato di calcio non è presente negli aggregati, in modo da poter garantire che la formazione di CaCO₃ è imputabile alla sola carbonatazione. In Figura 115 si riporta la curva TG di una malta in cemento con le tipiche perdite di peso imputabili al gesso ed all'acqua assorbita (<120°C), ai C-A-S-H (520-600°C) ed alla CaCO₃ a 760°C (108).

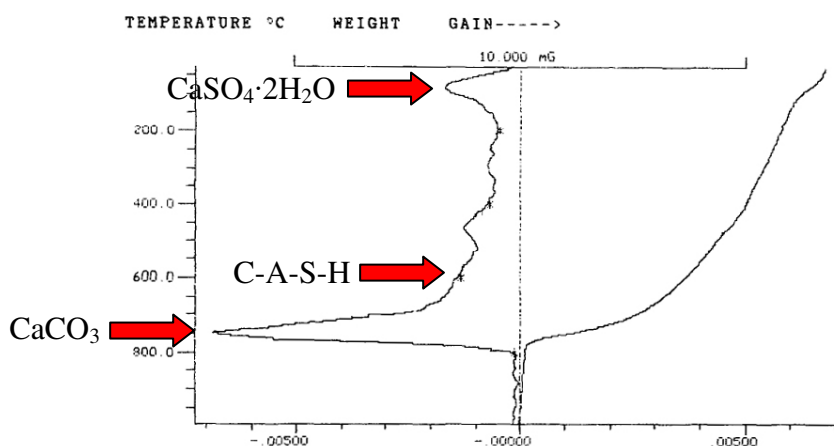


Figura 115 Curva TG di una malta in cemento dalla chiesa di Hagia Sophia (108).

La spettroscopia secondo la trasformata di Fourier (*Fourier Transform Infra-Red spectroscopy*, FTIR) è un metodo di analisi legato all'interazione tra la radiazione all'infrarosso applicata e le molecole del composto. Quando la radiazione infrarossa incidente raggiunge la lunghezza d'onda critica, le vibrazioni tipiche di legame vengono eccitate ed un detector registra la riduzione di intensità dovuta all'assorbimento di lunghezza d'onda dai legami atomici, e questo può essere legato agli specifici tipi di legame atomico caratteristici di un particolare gruppo funzionale. I campioni sono preparati miscelando la polvere del campione con KBr e pressando il tutto fino ad ottenere delle pastiglie. L'analisi FTIR può identificare le principali fasi minerali di un legante ed additivi organici eventualmente aggiunti. I silicati ed i C-S-H possono essere identificati anche se con una certa difficoltà (102). Alcune possibili assegnazioni, secondo i diversi autori (109-111), sono riportate in Tabella 8. In ogni caso dal momento che l'analisi FTIR non permette un'assegnazione certa, questa deve essere utilizzata sempre in accoppiata con altre tecniche di indagine come la diffrazione o la microscopia.

Tabella 8 Possibile assegnazione di differenti picchi FTIR.

Lunghezza d'onda [cm ⁻¹] (109)	Possibile assegnazione (109)	Lunghezza d'onda [cm ⁻¹] (110)	Possibile assegnazione (110)	Lunghezza d'onda [cm ⁻¹] (111)	Possibile assegnazione (111)
656-658	ν_4 di SiO_4	700-1500	C-O	443	Al-O in C-A-H, tobermorite
714	ν_4 di CO_3	930 1000-1010	Silicato di calcio	486	Si-O-Si, tobermorite
847-848	Al-O, Al-OH	1030-1035	Pozzolana	537	Al-O in C-A-H, tobermorite
1011-1080	Silicati polimerizzati	1080	SiO_2	713	Calcite, aragonite
1200-1202	Singenite, thenardite	1100-1300	S-O	745	Calcite, vaterite
1400-1500	CO_3	1620-1650	H_2O	876	Calcite, vaterite
1795-1796	CaCO_3	1620-1685	S-O	971	Si-O in C-S-H, ν_3 di SiO_4
2513-2514	CaCO_3	2500-3000	C-O	1048	Si-O
2875-2879	CaCO_3	2850-2855 2920-2930	CaCO_3	1070	Si-O, jennite
2983-2984	CaCO_3	3100-3600	S-O	1121	Si-O
3319-3327	Singenite, thenardite	3400-3450	H_2O	1449 - 1473 - 1488	Aragonite, vaterite, calcite
3611	Bassanite	3409-3414	H_2O	1638	H_2O
3641-3644	Ca(OH)_2	3630	Tobermorite	2858	Sostanze organiche
		3650	Ca(OH)_2	3444-3447	H_2O

La microscopia ottica viene eseguita su campioni in sezione sottile od in sezione lucida. Per preparare le sezioni lucide è necessario segare il campione per ottenere una superficie liscia. Il campione è quindi seccato a 40°C in una stufa fino al raggiungimento della massa costante. Una volta secco il campione viene incapsulato in appositi cilindri in polietilene ed impregnato sotto vuoto con una resina epossidica colorata con un pigmento a scelta (di solito rosso o blu). La resina epossidica utilizzata deve avere: una durezza sufficiente da consentire di ottenere una superficie lucida e minimizzare lo sviluppo di asperità durante la lucidatura; un rapido indurimento senza un eccessivo ritiro; una bassa viscosità per penetrare il più possibile nel campione; una fluidità che garantisca buoni legami tra le particelle ed un sufficiente tempo aperto per assicurare l'impregnazione. Per campioni che tendono a sfaldarsi, la resina deve garantire anche un buon consolidamento. Quando la resina è indurita il campione può essere tagliato con una piccola sega o direttamente lucidato con gli appositi dischi al carburo di silicio per rimuovere la resina al di sopra della superficie del campione. Successivamente si continua la lucidatura con dischi al carburo di silicio sempre più fini (No. 400, 800, 1200, 1400) fino alla lucidatura finale eseguita con polvere diamantata (0,25µm) per ottenere l'effetto specchio. La lucidatura è l'operazione più importante dal momento che influenza la qualità dell'immagine osservata al microscopio. Questa può essere ottenuta manualmente o con apposite macchine lucidatrici che possono lucidare fino a quattro campioni contemporaneamente. Il campione viene infine pulito con alcool ed asciugato (112).

Usando il microscopio ottico in luce riflessa è possibile attaccare la superficie della sezione lucida con differenti acidi e reagenti per rendere più chiara la microstruttura del campione e dei singoli cristalli. In Tabella 9 sono riportati i principali tipi di acidi utilizzati e le relative fasi messe in evidenza nello studio dei grani anidri delle malte idrauliche. Il C_2S è presente in tre diverse forme: α , β , γ . La forma α - C_2S si forma all'incirca a 1425°C, fonde a 2130°C ed è bi-piramidale e bi-trigonale. α' - C_2S è derivato dalla fase α e cristallizza tra 830°C e 1447°C. La forma β - C_2S è metastabile sotto 670°C, è monoclinico e costituisce la gran parte della belite in un clinker. Il γ - C_2S si forma a 830°C ed è ortorombico (112). La forma β è stabile tra 675°C-1420°C, sotto i 500°C la forma β diventa γ . Quest'ultima forma è il risultato di un raffreddamento molto lento che non accade quasi mai (105). I grani di β - C_2S sono marroni-giallognoli, arrotondati e possono presentare striature in diverse direzioni, mentre i grani di C_3S

sono più spigolosi. Nel C_2S , magnesio, potassio, sodio, bario, cromo, alluminio, manganese, fosforo e ferro possono sostituire i silicati. Queste impurità possono essere approssimate al 6% (112). Come già spiegato precedentemente in merito alla diffrazione, le malte di cemento romano presentano un maggior quantitativo di C_2S , mentre quelle di cemento Portland presentano più C_3S .

Tabella 9 Soluzioni reagenti e loro effetti sulle fasi del clinker (112, 113).

Soluzione	Tempo	Fase del clinker	Colore	Note
Soluzione di idrossido di potassio – alcool etilico (5%)	20 s	C_3A	Blu	Lavare la superficie con una soluzione 1:1 di alcool etilico ed acqua seguita da un lavaggio in alcool isopropilico. Lucidare per 15 s con un panno in microfibra ed asciugare.
Idrossido di sodio (2,5 g) – alcool etilico (10 ml – acqua (40 ml)	20 s	C_3A	Blu	
Soluzione di idrossido di potassio (0,1 molare con acqua)	30 s	C_3A	Blu/Marrone	Sciacquare con alcool isopropilico in spray ed asciugare con getto d'aria tiepida.
Bollire una soluzione di idrossido di sodio (10% in massa)	20 s	C_3A	Blu/Marrone	
Acqua distillata tiepida (40°C)	5-10 s	C_3A C_2S CaO C_3S	Blu/Marrone Marrone Multicolor Inalterato	
Acido salicilico (0,2 g) – alcool isopropilico (25 ml) – acqua (25 ml)	20-30 s	C_2S C_3S (le macchie di C_2S sono il 50% più veloci di quelle di C_3S)	Blu/Verde Blu/Verde	
Acido salicilico (0,5 g) – alcool metilico (50 ml)	45 s	C_2S	Struttura lamellare	
Acido nitrico (1,5 ml) – alcool metilico / o isopropilico / o alcool amilico (100 ml)	6-10 s	C_2S C_3S	Marrone/blu Blu/Verde	
Cloruro d'ammonio (1 g) – acqua (20 ml) – alcool etilico (20 ml) – acetone (10 ml) – alcool isopropilico (150 ml)	10-15 s	C_3S C_2S	Marrone Inalterato	
Solfuro d'ammonio (2%, soluzione d'acqua)	10 s	C_3S C_2S	Blu Inalterato	
Nitrato d'ammonio (1 g) – acqua (20 ml) – alcool etilico (20 ml) – acetone (10 ml) – alcool isopropilico (150 ml)	25-30 s	C_3S C_2S	Giallo/Verde Marrone	
Soluzione di borace (1%)	30 s	$C_{12}A_7$	Grigio	Lavare con alcool
Soluzione di borace (1%)	10 s	C_3S C_2S	Blu Inalterato	
acido etilendiamminotetracetico (EDTA). EDTA (5g) – acqua distillata (100 ml) – alcool etilico denaturato (100 ml)	60 s	C_3S C_2S C_4AF C_3A	Blu/Verde Non molto colorato Riflessi brillanti Grigio	La sezione lucida è coperta dall'acido ed altre due gocce sono aggiunte ogni 10 s fino ad un minute. Asciugare la superficie con alcool etilico.

La microscopia ottica eseguita su sezioni lucide attaccate con borace permette di identificare le fasi anidre con maggiore dettaglio, grazie ai colori: il C_2S (sferico ed arrotondato) è marrone; il C_3S è blu (Figura 116), il C_3A è grigio, la matrice di alluminati di calcio (come il C_4AF) è bianca. In particolare 3 tipi di C_2S possono essere identificati secondo la classificazione di Insley (1936):

- tipo I: questo tipo di cristallo forma grani arrotondati con 2 o più serie di striature che si intersecano. Queste lamelle sono composte da fasi α ed α' . All'interno della fase α' si sviluppano ulteriori striature parallele di fase α' e β (Figura 117). Durante la cottura, da basse temperature fino a $1100^{\circ}C$ - $1400^{\circ}C$, la belite è un minuto cristallo della forma α' , e attraverso l'inversione $\alpha' \rightarrow \alpha$ la belite ricristallizza in un grande cristallo di fase α , assorbendo impurità dal fuso. La forma α è un cristallo rotondo e piano senza striature. Attraverso il processo di raffreddamento, sottili lamelle di α' appaiono nel cristallo rotondo di α . Gradualmente le lamelle aumentano e si estendono lungo tutto il cristallo fino a quando la belite è raffreddata a temperature ambiente. Se il clinker è raffreddato troppo rapidamente, molta fase α rimane tra gli spazi lasciati liberi tra le lamelle.

- tipo II: questo tipo di cristallo forma grani irregolari con una serie di striature parallele sviluppatesi durante la trasformazione $\alpha' \rightarrow \beta$. Le striature parallele nel tipo II sono osservate nel clinker prodotto a basse temperature o raffreddato molto lentamente (Figura 118).

- tipo III: questo tipo di cristallo forma grani irregolari senza striature ed è un singolo cristallo con una struttura interna uniforme. Questi grani di clinker sono ottenuti dalla crescita eccessiva sul tipo I. Il tipo III di belite, la forma senza lamelle, non è comune nei normali clinker (112).

Con il microscopio ottico è possibile inoltre stimare altre caratteristiche della malta, come: il grado di idratazione (la presenza di grani di clinker dimostra il basso grado di idratazione); la temperatura di cottura (la natura eterogenea e la forma irregolare dei grani di clinker indica che la temperatura all'interno della fornace non era costante); grado di macinazione del clinker (dimensioni medie del clinker tra 100 - $500\mu m$ sono dovute ad una insufficiente macinatura del clinker); grado di raffreddamento (i grani irregolari di C_2S e la separazione del C_3A dal C_4AF in due zone ben distinte, sono dovuti ad un lento raffreddamento, Figura 119 e Figura 120) (105, 113-116).

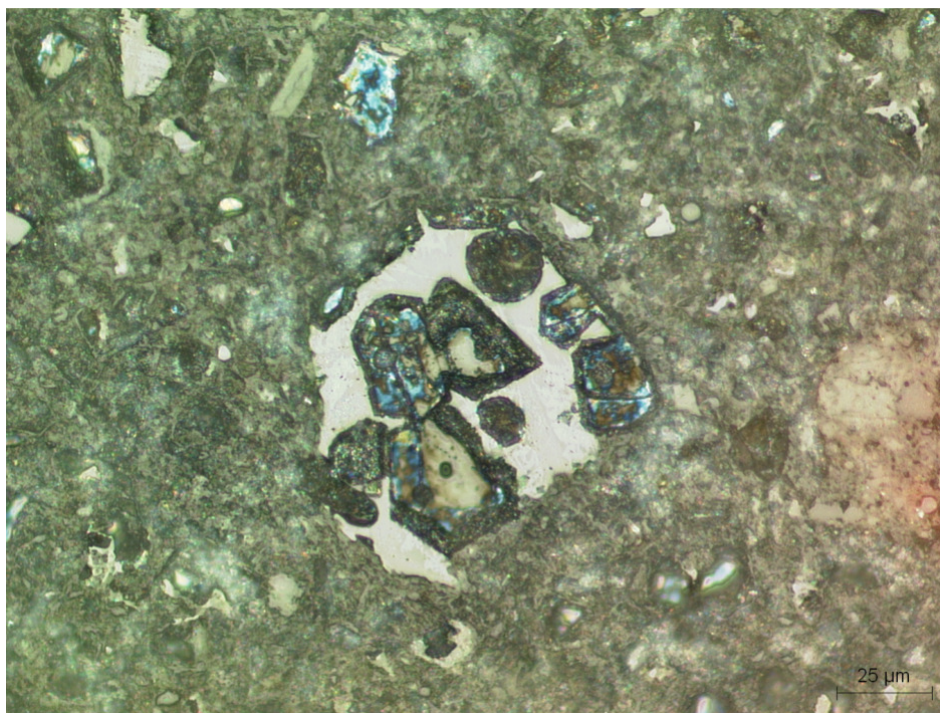


Figura 116 Sezioni lucide eseguite su un campione di pasta di cemento Portland, attacco con borace. I cristalli di alite (spigolosi e blu) sono visibili all'interno del grano anidro.

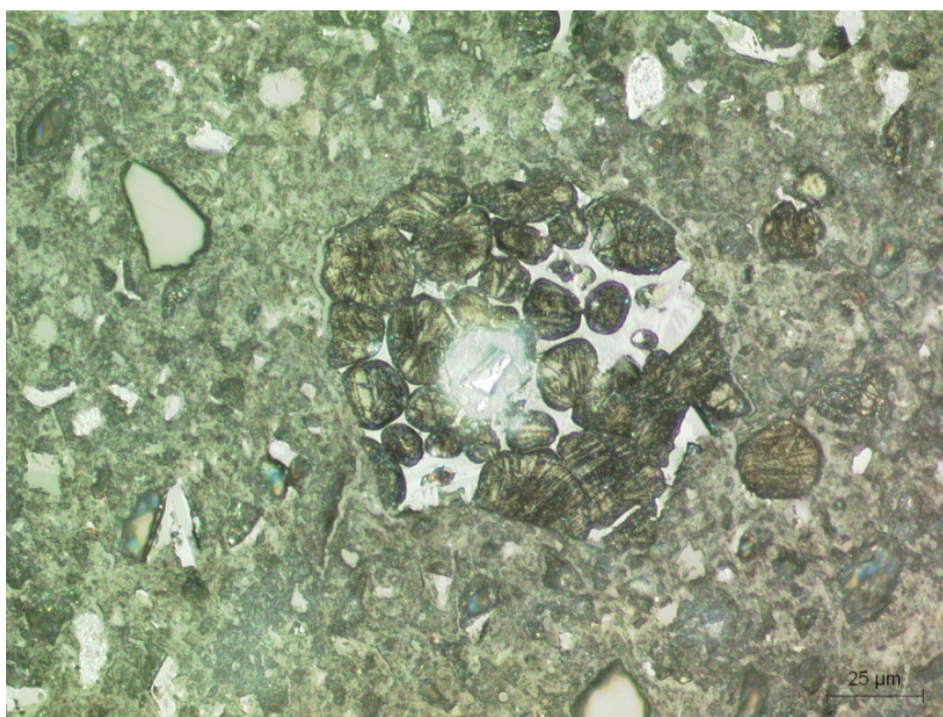


Figura 117 Sezioni lucide eseguite su un campione di pasta di cemento Portland. I cristalli di belite del tipo I sono chiaramente visibili all'interno del grano anidro.

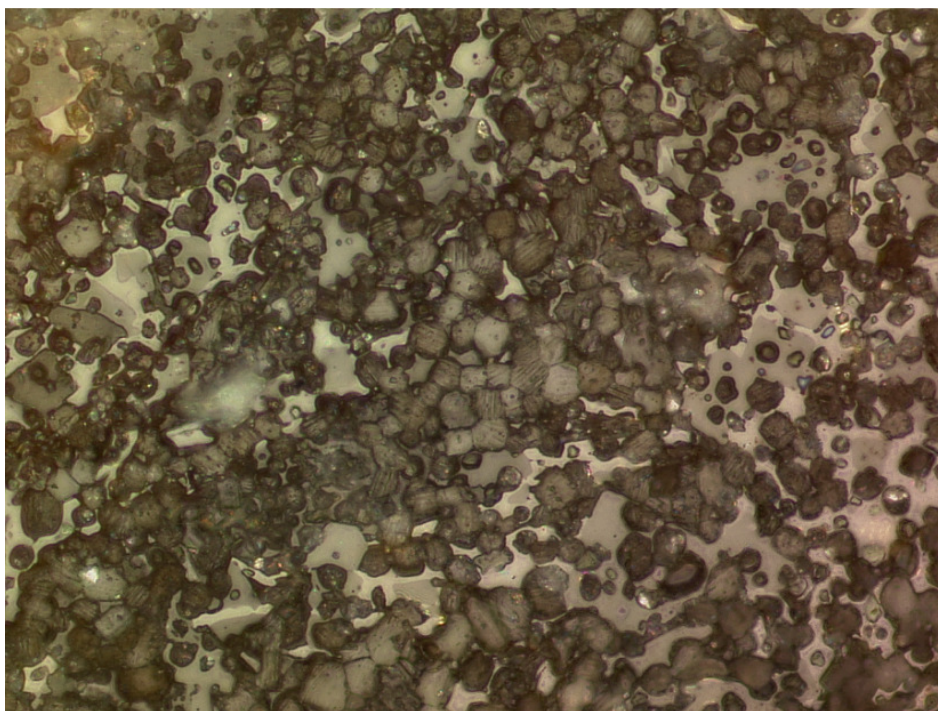


Figura 118 Sezioni lucide eseguite su un campione di malta in cemento romano (Francia, fine XIX sec.). Piccoli cristalli di belite di tipo II sono visibili al centro.

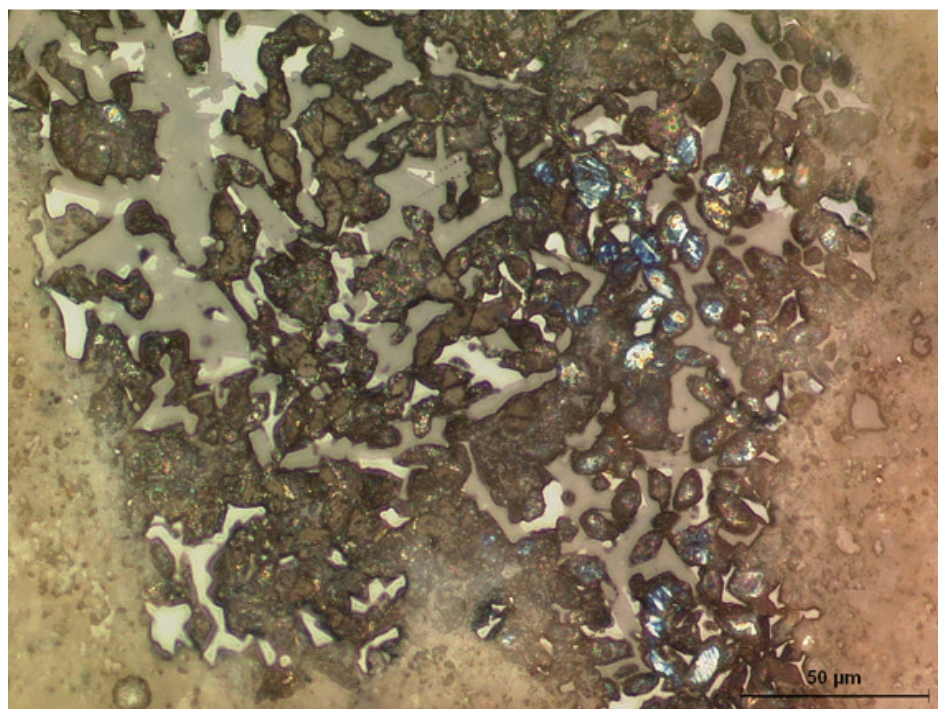


Figura 119 Sezioni lucide eseguite su un campione di malta in cemento romano (Francia, fine XIX sec.). La separazione tra la fase ricca in ferro (C₄AF, bianca) ed il C₃A (grigio) è chiaramente visibile in alto a sinistra. Questo è dovuto ad un lento raffreddamento.

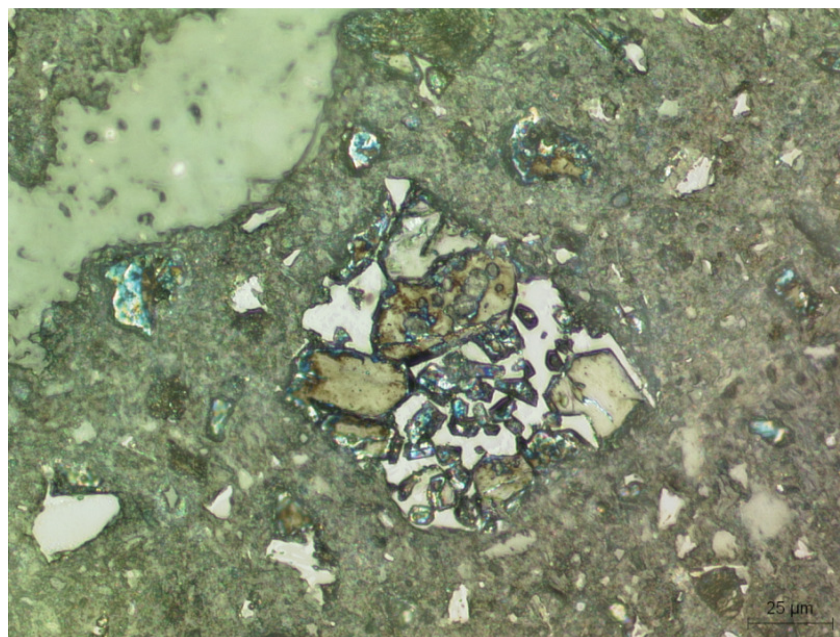


Figura 120 Sezioni lucide eseguite su un campione di pasta di cemento Portland, attacco con borace. Non è visibile alcuna separazione tra il C_3A ed il C_4AF , rapido raffreddamento.

SEM

I campioni per le osservazioni al SEM sono preparati in sezione lucida o con superficie di frattura:

- le sezioni lucide sono le stesse utilizzate per il microscopio ottico. Utilizzando le sezioni lucide è possibile ottenere un'analisi quantitativa degli elementi chimici della fase osservata utilizzando la tecnica degli elettroni retrodiffusi (*Back Scattered Electron*, BSE) con un detector di raggi X (EDS). Con le sezioni lucide si può eseguire la determinazione quantitativa dei grani anidri (Figura 121 - Figura 122), inoltre si può studiare la distribuzione della dimensione dei grani e l'interfaccia matrice-aggregato.
- le superfici di frattura permettono di osservare la microstruttura della malta ad alti ingrandimenti ed in 3 dimensioni (ad esempio: aghi di C-S-H, grani anidri, portlandite di forma esagonale, aggregati, etc). Con l'analisi EDS si può eseguire un'analisi quantitativa degli elementi chimici delle singole fasi osservate. Il campione viene coperto con uno strato conduttore di oro o carbonio, per renderlo conduttore e facilitare la rimozione delle cariche elettriche dal campione⁸². Con le analisi al SEM è possibile caratterizzare anche le fasi idratate nella malta, che non possono essere identificate con

⁸² Questo strato molto sottile è depositato sia per evaporazione in alto vuoto che per spruzzo del rivestimento in basso vuoto. La scelta dello strato conduttore è legata alla sostanza analizzata, dal momento che i picchi di oro e carbonio possono coprire durante l'analisi EDS altri picchi della fase analizzata. Comunque, usando un *Environmental-SEM* (ESEM) con il basso vuoto, il campione può essere analizzato senza metallizzazione.

un microscopio petrografico convenzionale e la diffrazione dal momento che sono troppo piccole ed amorfe (102).

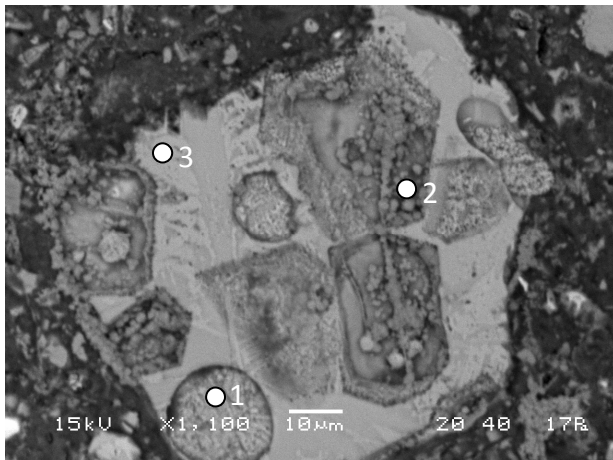


Figura 121 Grano anidro di un campione di malta di cemento Portland appositamente preparata. Nel punto 1 un cristallo di belite, nel punto 2 un cristallo di alite e nel punto 3 la fase interstiziale di C_4AF .

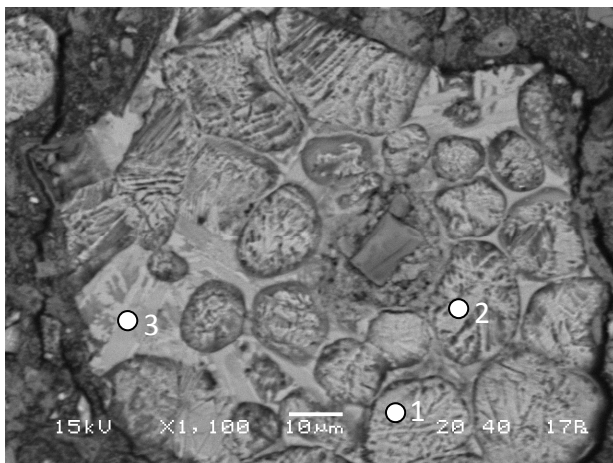
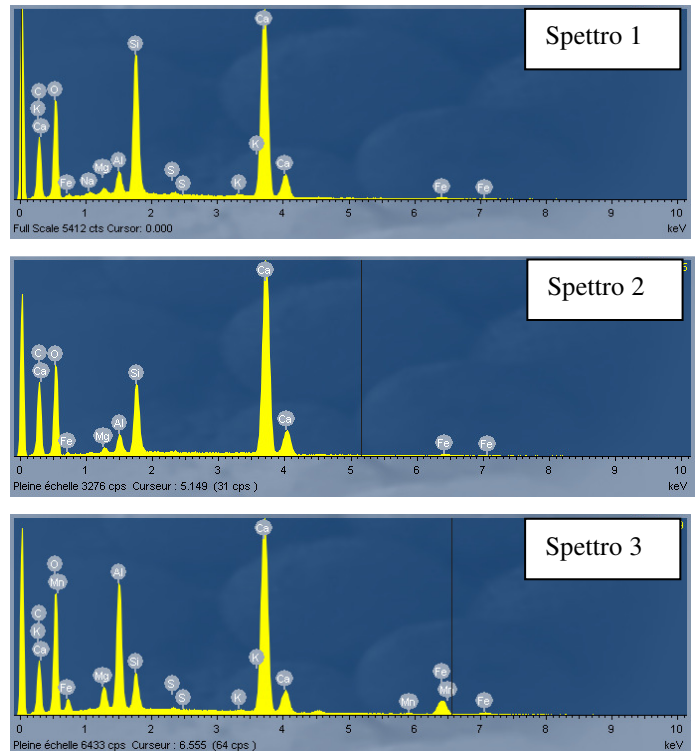
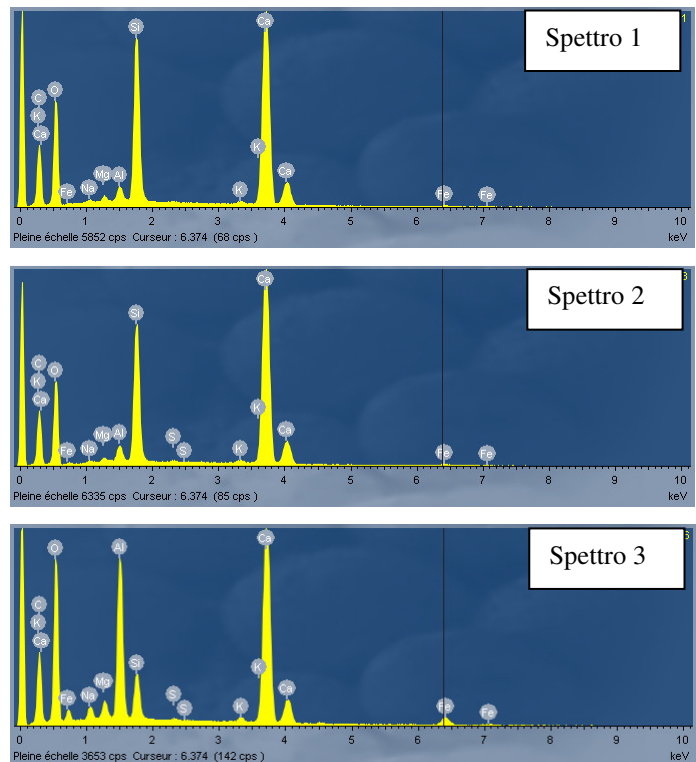


Figura 122 Grano anidro di un campione di malta di cemento Portland appositamente preparata. Nei punti 1 e 2, cristalli di belite e nel punto 3 la fase interstiziale di C_3A .



Con il SEM è possibile osservare anche la portlandite esagonale nei pori e nella matrice delle malte idrauliche, gli aghi di ettringite (Figura 123) e gesso nei pori o nella pasta di cemento.

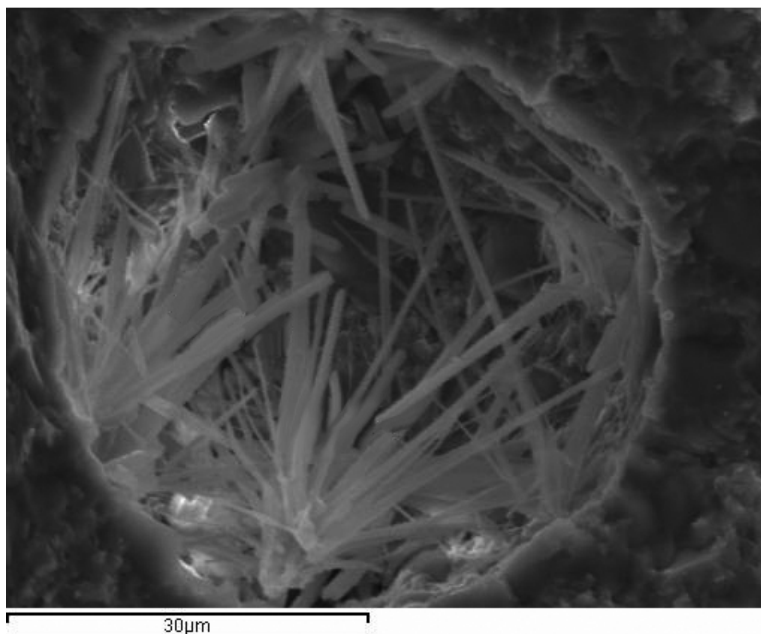


Figura 123 Ettringite all'interno di un poro, gentile concessione di LRMH.

In particolare, tre diversi tipi di ettringite possono coesistere all'interno dello stesso materiale:

- l'ettringite primaria, che è il prodotto della idratazione del cemento a causa dell'aggiunta di gesso al cemento Portland per impedire la rapida presa. I cristalli di ettringite sono per lo più cristallizzati in forma di aghi e distribuiti omogeneamente all'interno della matrice di cemento senza micro-fessure.
- l'ettringite secondaria con aumento di volume si forma a seguito di una reazione tra i componenti della malta ed i solfati presenti negli inquinanti dell'aria. Questi cristalli non sono in genere ben cristallizzati in forma d'aghi, ma hanno un aspetto colloidale a causa della formazione *in situ* con un trasporto limitato di materia.
- l'ettringite secondaria, senza aumento di volume, è prodotta dopo la dissoluzione e ricristallizzazione di ettringite preesistente (primaria o ritardata) quando il calcestruzzo o la malta sono esposti all'acqua per lunghi periodi di tempo. L'ettringite lascia la sua posizione originale, va in soluzione e ricristallizza nei pori e nelle crepe. In condizioni di estremo degrado i pori sono completamente riempiti di cristalli di ettringite. Questo tipo di ettringite non ha carattere espansivo in sé, ma può accompagnare fenomeni di

espansione (la dissoluzione e ricristallizzazione di ettringite nelle fratture può provocare dei rigonfiamenti).

- la formazione ritardata di ettringite (*Delayed Ettringite Formation*, DEF) è collegata alle condizioni particolari che si verificano nei calcestruzzi sottoposti a trattamenti termici. Infatti quando la temperatura supera i 70°C, l'ettringite primaria viene decomposta, ma se il calcestruzzo è sottoposto ad un certo ammontare d'acqua e ad un abbassamento della temperatura, l'ettringite si riforma generando fenomeni espansivi che fessurano il calcestruzzo o la malta (117).

Le analisi chimiche devono essere condotte dopo le analisi petrografiche e mineralogiche, in quanto da sole non possono fornire tutte le informazioni necessarie nella caratterizzazione delle malte. Inoltre per le malte di cemento, la separazione tra legante ed aggregato non è sempre facile in quanto l'aggregato può essere completamente o parzialmente solubile in acido (carbonato di calcio). Queste difficoltà creano problemi di interpretazione dei risultati e nella determinazione del rapporto legante/aggregato. Se l'aggregato ed il legante non sono ben separati, i risultati ottenuti devono essere interpretati in base ai risultati delle diffrattometrie. Le analisi chimiche possono essere condotte sull'intero campione o sulle due frazioni separate. Le considerazioni più importanti sono:

*Analisi
chimiche
ed XRF*

- usare un campione rappresentativo;
- condurre le analisi petrografiche e mineralogiche prima delle analisi chimiche, dal momento che è necessario sapere se l'aggregato è solubile in acido per decidere come separare la malta (con HCl per malte con aggregato insolubile, con ultrasuoni per aggregati completamente o parzialmente solubili in acido);
- dopo la separazione il campione deve essere seccato a 40°C fino al raggiungimento della massa costante ed inoltre deve essere calcolato il contenuto di umidità;
- se il campione contiene sali solubili in acqua, questi devono essere eliminati immergendo il campione in acqua distillata;
- come per le diffrattometrie, il campione deve essere setacciato ed il passante a 63 µm sarà considerato la frazione ricca in legante, mentre il trattenuto sarà l'aggregato.

Le analisi chimiche possono essere condotte anche con la tecnica della fluorescenza a raggi X (XRF). Questa tecnica determina la composizione chimica del campione espressa in ossidi (% in peso di CaO, SiO₂, Al₂O₃, etc.) e con questi risultati è possibile disegnare il triangolo (CaO + MgO) – Al₂O₃ – SiO₂ utile per la caratterizzazione delle

malte idrauliche (Figura 124) e determinare l'indice di idraulicità ($HI = (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_{tot}) / (CaO + MgO)$) (118).

I cementi Portland differiscono da quelli naturali per il loro contenuto in Al_2O_3 più basso rispetto ai secondi e per un quantitativo di CaO più controllato. Il cemento Portland può dunque essere inserito tra le calce idrauliche ed il cemento romano. In particolare i cementi naturali non presentano una composizione chimica particolarmente diversa da un Portland, in quanto la loro differenza è data da una temperatura di cottura inferiore e da un intervallo di temperatura più ampio. Con le analisi chimiche è inoltre possibile la determinazione del SO_3 solubile nel legante. I solfati sono collegati alla presenza di ettringite e gesso ma anche a marne non cotte o combustibili usati nella produzione del cemento (114).

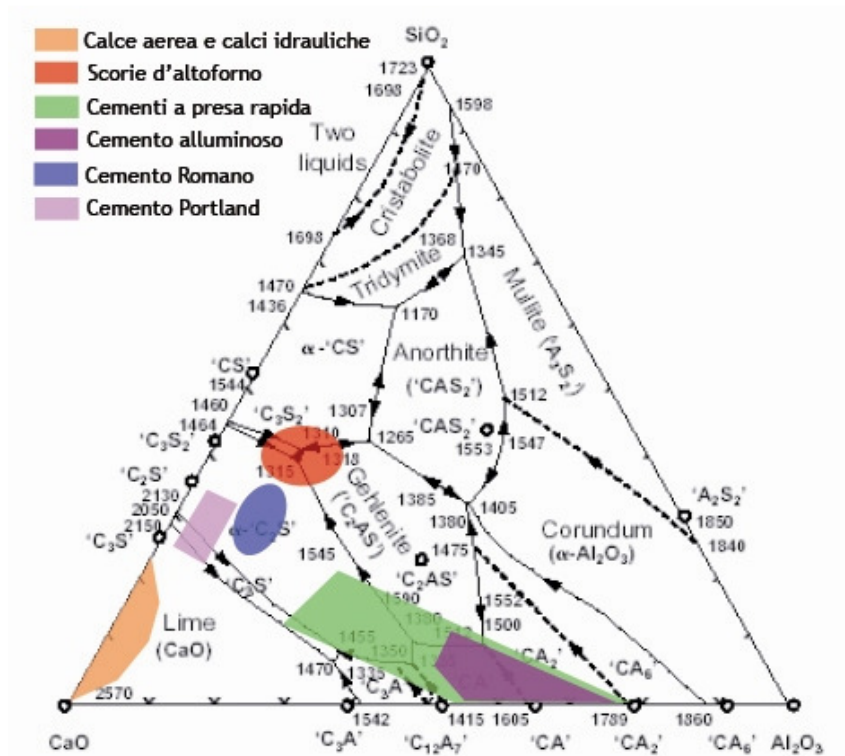


Figura 124 Composizione chimica (triangolo $CaO-Al_2O_3-SiO_2$) di diversi leganti, espresso in ossidi (105).

3.2 Caratterizzazione delle malte e protocollo diagnostico

Le diffrattometrie sulla frazione ricca in aggregato, ottenuta dalla disaggregazione e dalla separazione manuale della malta, fornisce informazioni sulla mineralogia dell'aggregato (carbonato di calcio, quarzo, feldspati, miche, etc.), ma non sulla litologia che può essere investigata con le sezioni sottili. Confrontando i diffrattogrammi ottenuti dai campioni oggetto di studio con quelli ottenuti da campioni di sabbia prelevati da fiumi nelle vicinanze dell'edificio, è possibile stimare l'origine dell'aggregato se la sabbia del fiume presenta gli stessi minerali. Inoltre, la diffrattometria può identificare anche particolari additivi (purché non amorfi) (102, 119).

*XRD sulla
frazione di
aggregato*

L'identificazione delle principali fasi cristalline legate al degrado possono essere facilmente trovate tramite diffrattometria (come l'ettringite, il gesso, gli ossalati di calcio, weddellite e whewellite in Figura 125 ed i sali che compongono le efflorescenze). Gli ossalati di calcio sono dovuti a: 1) trasformazione di materiale organico (per esempio oli, cere, etc., usati in passato come rivestimenti protettivi); 2) degrado biologico, dal momento che i licheni producono acido ossalico che reagisce con il sottostante materiale di natura carbonatica, che porta alla formazione di weddellite ($\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e whewellite ($\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$); 3) deposizione di inquinanti primari dovuti ad una incompleta combustione dei carburanti fossili, ed inquinanti secondari formati attraverso un'ossidazione fotochimica dei componenti a base di olefina (120).

L'analisi FTIR sull'aggregato può identificare solamente le componenti principali dell'aggregato (carbonati e quarzo) ed i prodotti della reazione alcali-silice. Possono essere identificate le bande di calcite ($875, 1425, 713 \text{ cm}^{-1}$), gesso ($672, 1122, 1145, 1621, 1685, 3406, 3547 \text{ cm}^{-1}$), quarzo e silicati ($790, 1080 \text{ cm}^{-1}$), nitrati di sodio e di potassio (1385 cm^{-1}). L'analisi FTIR può fornire utili informazioni aggiuntive per confermare i risultati delle diffrattometrie e per fornire informazioni aggiuntive come la presenza di composti organici (119).

FTIR

Il microscopio ottico può descrivere la struttura dell'aggregato (arrotondato, spigoloso, etc.), le sue dimensioni ed i minerali presenti (quarzo, feldspati, calcite, pirosseni, miche, etc.). Inoltre è possibile descrivere le dimensioni e la forma dei pori (irregolari o sferici) e verificare la presenza di fratture dovute al ritiro. La microscopia ottica viene utilizzata anche per identificare il rapporto legante/aggregato al fine di distinguere diverse tecniche di decorazione.

*Microscopia
ottica*

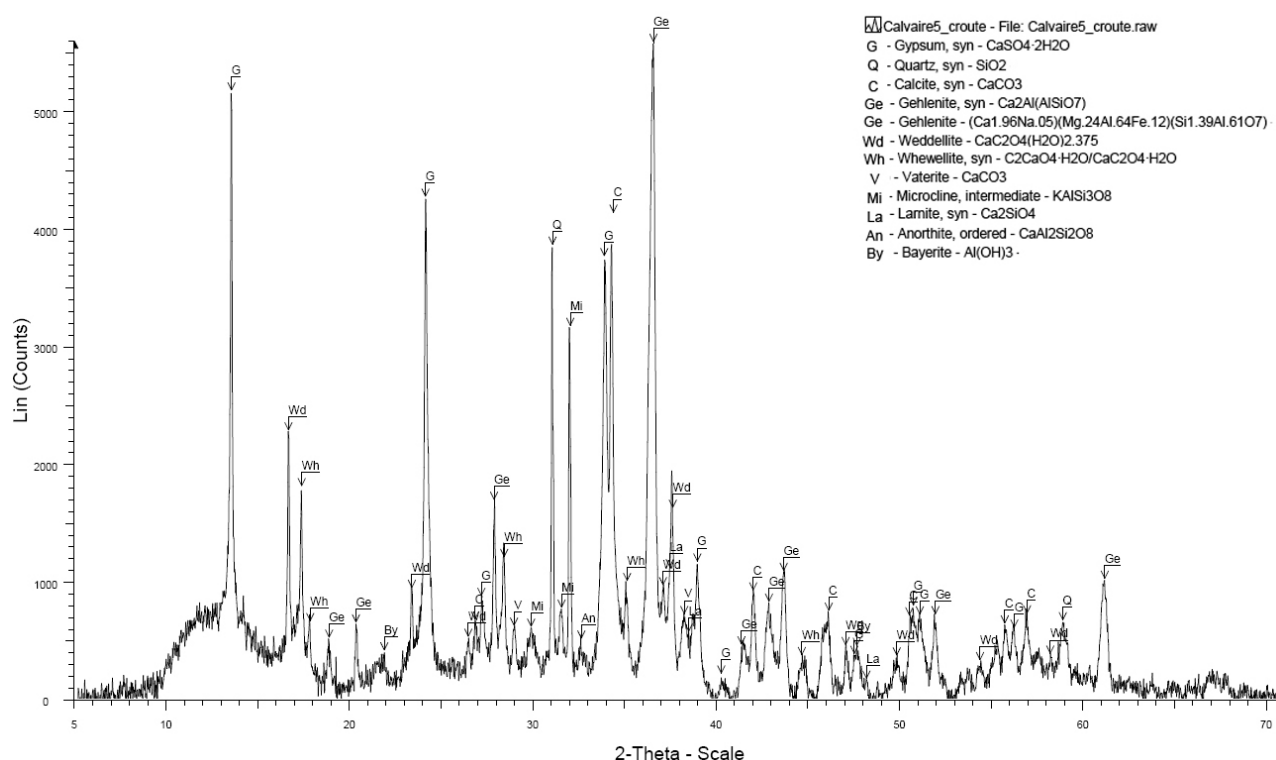


Figura 125 Campione di crosta nera prelevata da una malta di cemento romano (Francia, fine XIX sec.).

Il microscopio ottico è utilizzato anche per caratterizzazioni petrografiche di aggregati in sezione sottile. Per ottenere le sezioni sottili, il campione viene seccato a 40°C (per evitare la disidratazione del gesso e sbalzi termici) ed impregnato con una resina epossidica a bassa viscosità e colorata per rendere più visibili i pori e le fessure. Successivamente il campione viene lucidato, messo in un bagno ad ultrasuoni ed asciugato per pulire le eventuali impurità formatesi durante la lucidatura. Per raggiungere lo spessore di 20-30 µm, il campione viene fissato con una resina epossidica su di un vetrino liscio, tagliato con una sega e lappato, facendo attenzione alle relazioni tra abrasivo, legante ed aggregato. Infine il campione è pulito ancora una volta in un bagno ad ultrasuoni ed asciugato (102).

Analisi granulo- metrica

Per determinare l'assortimento granulometrico è molto importante utilizzare un campione rappresentativo. Infatti, tanto più un campione presenta un aggregato di grosse dimensioni tanto più il campione dovrà essere proporzionalmente significativo. Un altro problema è la separazione legante/aggregato che, come visto in precedenza, può essere condotta con attacco acido se l'aggregato è interamente quarzoso, oppure manualmente con aggregato calcareo. Dopo la separazione con acido l'aggregato deve essere filtrato e lavato con acqua che viene poi eliminata, mentre nel caso di separazione

meccanica con ultrasuoni l'acqua di lavaggio può essere conservata per ulteriori analisi (cromatografia ionica). L'aggregato viene quindi seccato a 105°C fino al raggiungimento della massa costante, pesato e setacciato con setacci con apertura di 0.063, 0.125, 0.250, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16mm, o qualunque altra dimensione si renda necessaria. I pesi delle frazioni trattenute dal setaccio vengono registrati e da questi si calcola la percentuale di passante cumulativo (118).

A causa della risalita capillare e della presenza di ioni nell'acqua (Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , etc.), alcuni sali possono cristallizzare in superficie a seguito dell'evaporazione dell'umidità. Analizzando il tipo di sale formatosi è possibile capire le cause di degrado:

Cromatografia ionica

- i solfati sono causati dalla deposizione secca ed umida della SO_2 presente in atmosfera, che reagisce con il carbonato di calcio con formazione di gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);
- i nitriti ed i nitrati (provenienti dal terreno o da contaminazione biologica), sono molto solubili e non formano componenti stabili con le malte;
- i cloruri solitamente legati all'ambiente marino.

Dal momento che la presenza di sali è generalmente legata all'altezza di risalita dell'acqua è necessario prelevare diversi campioni a diverse altezze e profondità. Il contenuto di sali è quindi determinato a partire da un campione d'acqua in cui i sali sono disciolti all'interno. Un campione di malta viene frantumato finemente e successivamente seccato e pesato a 40°C fino al raggiungimento della massa costante. Il campione viene quindi immerso in acqua demineralizzata bollente per estrarre i sali e la soluzione così ottenuta viene filtrata e raffreddata a temperatura ambiente (118).

L'utilizzo del SEM con l'analisi EDS può permettere anche di determinare il contenuto di zolfo in funzione della profondità, ottenendo una cartografia della sezione divisa in differenti zone a seconda del quantitativo di zolfo presente. La microstruttura della superficie di un campione degradato presenta una grossa percentuale di zolfo, che corrisponde alla parte di crosta nera causata dalla solfatazione ambientale. La zona al di sotto della crosta nera può mostrare numerose microfessure parallele alla superficie riempite con cristallizzazioni di gesso e singenite. Andando sempre più in profondità la concentrazione di zolfo diminuisce sempre più fino a raggiungere una zona in cui le cristallizzazioni di gesso (e quindi lo zolfo) non sono più presenti. La profondità di tale zona dipende dal grado di solfatazione raggiunto dal campione e dalla porosità dello stesso (115).

SEM

La porosità influenza le proprietà meccaniche, il trasporto di umidità e la durabilità. I seguenti valori sono fondamentali per la descrizione dei materiali porosi:

- la porosità aperta, può essere determinata attraverso il test della bilancia idrostatica o tramite porosimetria ad intrusione di mercurio (*Mercury Intrusion Porosimetry*, MIP);
- la distribuzione della dimensione dei pori, la superficie specifica ed il diametro dei pori vengono misurati automaticamente dalla porosimetria ad intrusione di mercurio⁸³.

La struttura dei pori è molto complessa a causa dei diversi parametri che la influenzano, per esempio: il diverso tipo di aggregato che compone la malta, il tipo di legante, il rapporto acqua/cemento e cemento/aggregato (Figura 126).

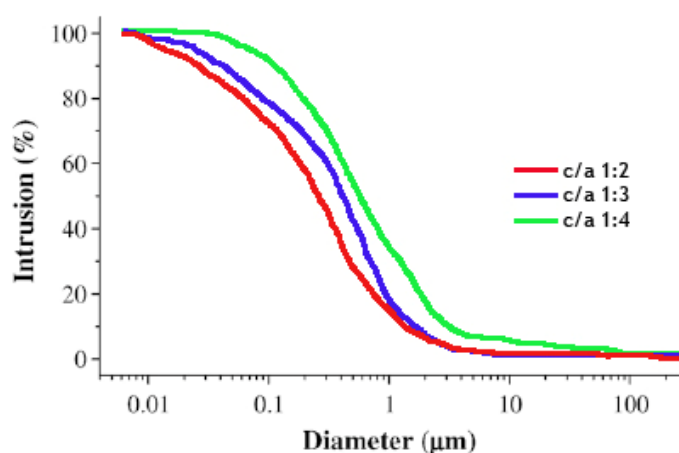


Figura 126 Distribuzione cumulativa del diametro dei pori di una malta di cemento al variare del rapporto cemento/aggregato (122).

Con le osservazioni al SEM si possono osservare diversi tipi di pori. I pori capillari (0.1-100 μm) possono essere all'interno del legante e nell'interfaccia aggregato/matrice. Questa porosità si sviluppa durante la prima fase di indurimento ed essiccamento, ed è influenzata in una seconda fase dalla carbonatazione. I pori più grossi (>100 μm) sono generalmente formati dall'aria intrappolata durante la miscelazione. Le fratture possono essere osservate usando una luce parallela, mentre le microfratture (<10 μm) con una

⁸³ Questa tecnica è basata sulla premessa che un liquido non bagnante come il mercurio entra nei pori solo se soggetto ad una pressione esterna, secondo l'equazione di Washburn:

$$P = \frac{-4\gamma\cos\theta}{d}$$

P = pressione [N], γ = tensione superficiale del liquido [0.480 N·m⁻¹], θ = angolo di contatto [141.3°], d = diametro del capillare [m]

Il mercurio è forzato ad entrare nei pori attraverso una pressione esterna in alto vuoto. La distribuzione della dimensione dei pori è determinata a partire dal volume di mercurio intruso per ciascun incremento di pressione, mentre la porosità totale dal volume totale di mercurio intruso. A causa della complessità della struttura porosa, questa tecnica richiede alcune semplificazioni, ad esempio si assume che la geometria dei pori sia regolare (di solito cilindrica) e che i pori siano interconnessi (117).

illuminazione fluorescente. Le crepe possono essere causate da diversi fattori, per esempio: l'essiccazione che forma crepe irregolari ed orientate a caso, oppure un aumento di volume (sali, ASR, gelo) che crea fratture più nette (121).

Nel restauro degli edifici la compatibilità tra le nuove malte di ripristino e la superficie è essenziale. Le caratteristiche microstrutturali della malta (come la porosità) sono essenziali per assicurare la compatibilità. La porosità delle malte di calce e cemento varia dal 20 al 45%, ma le malte idrauliche con un elevato livello di idraulicità mostrano una riduzione del raggio dei pori. Quindi la struttura densa delle moderne malte a base di cemento è la causa principale dei problemi di incompatibilità con il supporto⁸⁴ (123).

In Figura 127 sono riassunte le tecniche diagnostiche da utilizzare per la caratterizzazione microstrutturale del campione e quali informazioni si possono ottenere da ciascuna di esse. Il protocollo diagnostico così ottenuto fornisce inoltre un'indicazione sul numero di campioni da preparare per ciascun prelievo e sull'ordine con cui le indagini diagnostiche vadano eseguite, al fine di massimizzare i risultati e ridurre il quantitativo di materiale necessario, dal momento che il prelievo dei campioni riguarda sempre piccole quantità, per evitare grosse lacune superficiali.

⁸⁴ L'ammontare di acqua assorbita in un tempo stabilito è legato alla porosità ed è possibile stimarlo attraverso la formula seguente: $m = A \cdot t^{1/2}$. Questa relazione descrive l'ammontare di acqua assorbita (g cm^{-2}) in un tempo stabilito (t) per campioni asciutti di sezione rettangolari ed in contatto con l'acqua in superficie. La costante A è chiamata coefficiente di assorbimento dell'acqua ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1/2}$). Il grado di assorbimento d'acqua è determinato dalla relazione: $h = B \cdot t^{1/2}$, dove h è l'altezza di risalita dell'acqua, B il grado di assorbimento dell'acqua ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$) e t il tempo. Il rapporto tra l'ammontare di acqua assorbita sottovuoto rispettivamente dopo 24 ore (N_t) e dopo 48 ore (N_{48}) è chiamato coefficiente di Hirschwald (S_{48}). Se la matrice di cemento presenta una capacità di assorbimento d'acqua e coefficienti cinetici sufficientemente alti rispetto al substrato, questa malta è adatta all'intervento perché il suo alto assorbimento capillare evita le ritenute d'acqua, specialmente all'interfaccia e limita il rischio di degrado dovuto alla cristallizzazione di sali (114).

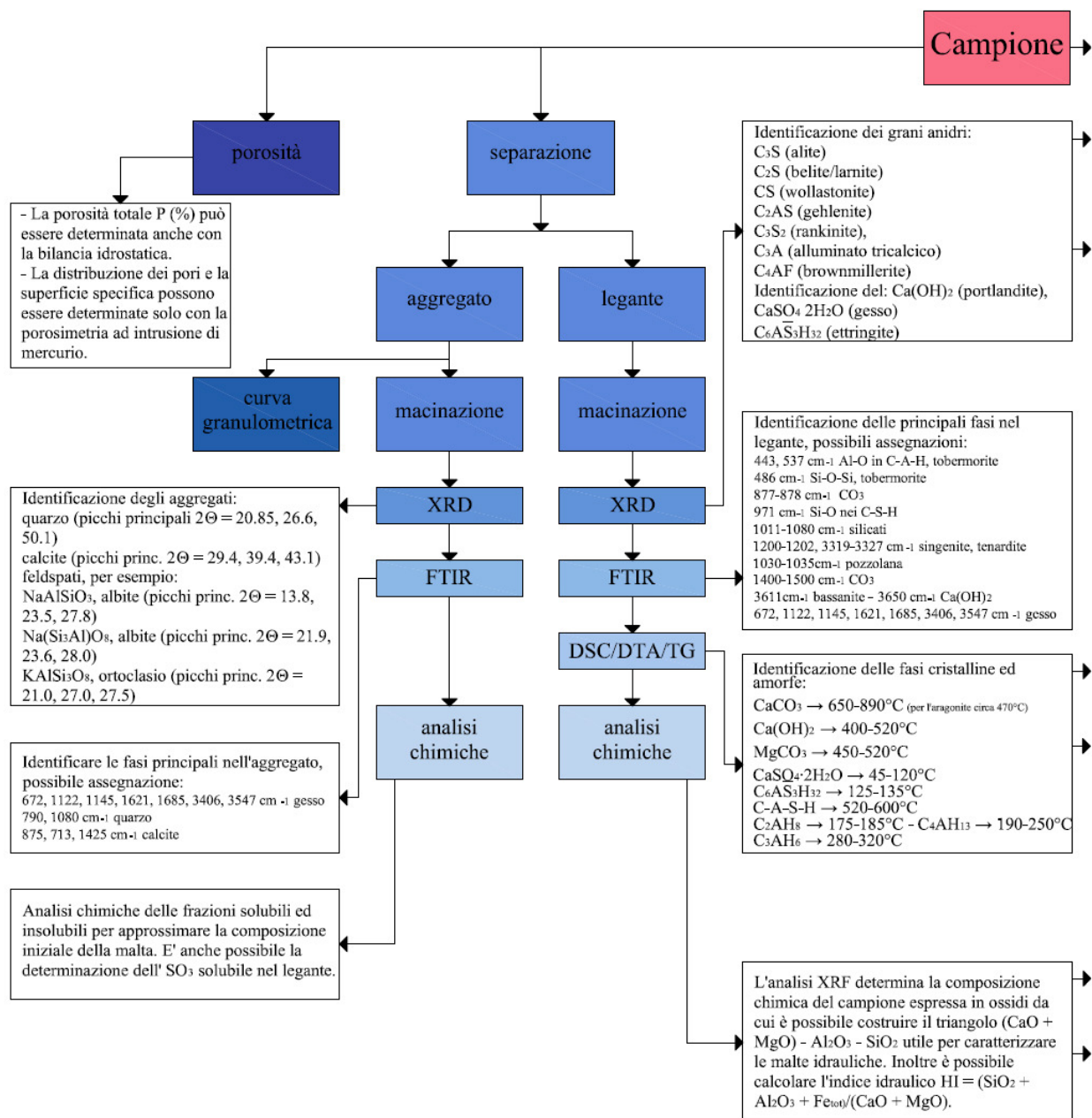
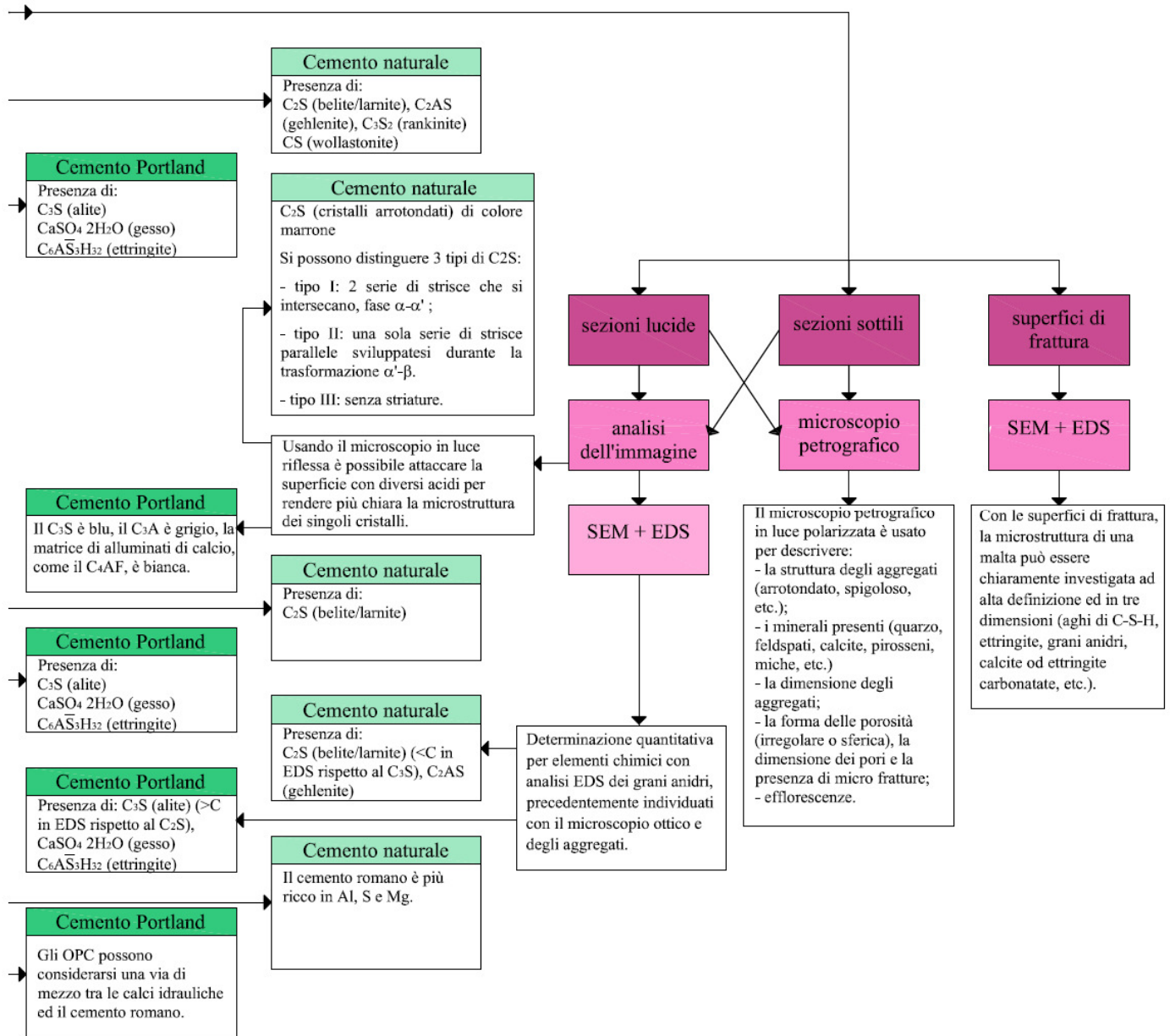


Figura 127 Schema per una caratterizzazione delle malte di cemento.



Parte 4 – Caratterizzazione dei campioni

4.1 Tecniche utilizzate

I campioni prelevati sono stati opportunamente preparati per potere eseguire su di essi alcune indagini diagnostiche. Ognuno di essi è stato diviso in più parti (generalmente tre o quattro) per potere eseguire su ciascuna parte una diffrattometria, un'osservazione al microscopio ottico in sezione lucida, un'osservazione al SEM in frattura ed una porosimetria. La porzione destinata alla diffrattometria è stata quindi grossolanamente frantumata per poter separare tramite setacciatura la frazione ricca in legante da quella ricca in aggregato, come spiegato precedentemente. La frazione ricca in aggregato è stata analizzata con un diffrattometro *D8 Advance Bruker AXS – Lynx Eye Detector Controller* (40 kV – 35 mA) con anodo in rame. Il campione macinato per la diffrattometria è stato successivamente riutilizzato anche per le analisi termogravimetriche (*TA Instruments Thermogravimetric Analyzer Q50*, analisi condotta in azoto). I campioni preparati in sezione lucida sono osservati con un microscopio Leica a 500x in luce riflessa. Gli stessi campioni sono stati poi osservati anche al SEM (JEOL – JSM 5600 LV) utilizzando la tecnica degli elettroni retrodiffusi, dopo avere ricoperto la superficie laterale del cilindro di resina con un apposito nastro adesivo al carbonio. In questo modo sono state eseguite analisi puntuali sui grani anidri precedentemente individuati al microscopio ottico, in alcuni casi sono state eseguite anche delle cartografie per individuare la possibile presenza di pigmenti minerali nei diversi strati di pittura, mentre per le malte al fine di stimare grado di solfatazione. I campioni preparati in frattura sono stati invece metallizzati al carbonio e successivamente osservati al SEM utilizzando la tecnica degli elettroni secondari. Le analisi porosimetriche sono state condotte invece utilizzando un'unità di macropori Fisons 120 ed un porosimetro Carlo Erba 2000, con software Milestone 200.

4.2 Risultati e discussione

Dalle diffrattometrie condotte (Tabella 10 - Tabella 11), le principali fasi che compongono i campioni sono: quarzo, calcite, feldspati, miche (muscovite) e cloriti (clinocloro). In particolare i feldspati maggiormente presenti sono: l'albite, l'ortoclasio ed il microcline. L'aggregato, a seguito di osservazioni al microscopio ottico su sezioni lucide, risulta di forma arrotondata ed è quindi probabilmente di origine fluviale. Per confermare questa ipotesi sono stati prelevati campioni di sabbia provenienti da alcuni fiumi delle province di Bologna (Reno e Sillaro) e Modena (Secchia e Panaro) e dal fiume Po. Le diffrattometrie eseguite su questi ultimi campioni mostrano una perfetta corrispondenza sia nei picchi principali di quarzo e calcite sia nei picchi degli elementi secondari. Infatti, sono stati individuati sia i tre tipi di feldspati principali che la muscovite ed il clinocloro, a qui vanno aggiunte la dolomite e la spangolite, che però compaiono solo in piccole tracce in entrambe le tipologie di campioni (malte e sabbie). I fiumi analizzati sono tutti compatibili con le malte analizzate, solo il fiume Po presenta una discreta differenza dal momento che la calcite è quasi assente.

XRD

*Confronto
con sabbie
di cava*

I diffrattogrammi delle malte non presentano quasi mai picchi di grani anidri ben definiti (quali belite, alite od alluminati di calcio). Solamente i campioni G12, G14, V6, V11 (Figura 128) e D6 presentano chiaramente belite e tracce di alite, negli altri casi si possono ipotizzare solamente tracce di entrambe le fasi cristalline. Tale scarsità di fasi anidre è da imputarsi in parte al tipo di campionatura (in quanto non è stato possibile prelevare campioni anche in profondità, dove possono essere presenti fasi anidre e non carbonatate) ed in parte alla forte idratazione dei campioni prelevati. In ogni caso, le osservazioni al microscopio ottico hanno permesso di analizzare meglio le poche fasi anidre rimaste, compresi il C_3A ed il C_4AF presenti anch'essi solo in tracce in alcuni diffrattogrammi. La vaterite e l'aragonite sono presenti in tracce solo in pochi casi (G11, G12, G14, V11), ma la loro presenza può fornire un utile indizio sulla natura idraulica del legante come spiegato già nei capitoli precedenti.

I campioni risultano tutti fortemente carbonatati (solo in G17 è stata rilevata della portlandite), mentre per quanto riguarda il degrado il gesso è stato individuato in tutti i campioni visibilmente anneriti, segno di una solfatazione già avvenuta ad opera dell'inquinamento atmosferico.

Tabella 10 Riassunto dei campioni di malta ritenuti più significativi prelevati presso villa Gina e villa Verde.

++++ = molto abbondante, +++ = abbondante, ++ = presente, + = tracce, - = assente.

	G3	G5 inf	G5 sup	G10 inf	G10 sup	G11	G12	G14	G17	V1	V3	V4	V5	V6	V9	V10	V11
Calcite - CaCO_3 (JCPDS 05-0586)	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	+++	+++	++++	++++	+++	++++	++++	++++	+++
Vaterite - CaCO_3 JCPDS 72-0506)	-	-	-	-	-	+	++	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aragonite - CaCO_3 (JCPDS 41-1475)	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	++
Portlandite - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (JCPDS 01-1079)	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Quarzo - SiO_2 (JCPDS 46-1045)	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++
Dolomite - CaCO_3 (JCPDS 74-1687)	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-	-
Albite ordered - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (JCPDS 09-0466)	+++	+++	++	+++	+++	++	-	+++	++	++	++	+++	+++	++	++	++	+++
Ortoclasio - $\text{K}(\text{Al, Fe})\text{SiO}_2\text{O}_8$ (JCPDS 08-0048)	+++	+++	++	++	++	+++	-	+++	+	++	+	++	++	+	+	+	-
Microcline - KAlSi_3O_8 (JCPDS 19-0932)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++	-	-	++
Clinocloro - 1MIIb, ferroan - (Mg, Fe) $_6(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ (JCPDS 29-0701)	+	++	-	++	-	+	-	-	++	+	+	++	+	+	++	++	+
Muscovite - 3T - (K, Na)(Al, Mg, Fe) $_2(\text{Si}_{3,1}\text{Al}_{0,9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (JCPDS 07-0042)	+	+	-	++	++	+	-	-	++	+	+	++	+	+	+	+	+
Anfibolo - $\text{Al}_{3,2}\text{Ca}_{3,4}\text{Fe}_{4,0}\text{K}_{,6}\text{Mg}_{6,0}\text{Na}_{1,0}\text{Si}_{12,8}\text{O}_{44}(\text{OH})_4$ (JCPDS 73-1135)	-	-	-	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-
Spangolite - $\text{Cu}_6\text{Al}(\text{SO}_4)(\text{OH})_{12}(\text{Cl}_{0,635}(\text{OH})_{0,365})(\text{H}_2\text{O})_3$ (JCPDS 81-1425)	-	-	+	+	++	-	++	+	++	-	+	++	+	+	+	+	-
Grossular - $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ (JCPDS 75-1551)	+	-	-	-	-	-	++	++	-	-	+	-	-	-	+	+	+
Grossular, hydroxylan - $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_4$ (JCPDS 42-0570)	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
Alite - Ca_3SiO_5 (JCPDS 42-0551)	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+
Larnite - $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ (JCPDS 33-0302)	-	-	-	-	-	-	++	+++	-	+	-	-	+	-	-	-	++
Gehlenite - $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ (JCPDS 20-0199)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wollastonite - CaSiO_3 (JCPDS 84-0655)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anorthite - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (JCPDS 41-1486)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Browmillerite - $\text{Ca}_2(\text{Al, Fe})_2\text{O}_5$ (JCPDS 30-0226)	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+
Calcium Aluminum Oxide - $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ (JCPDS 38-1429)	-	-	+	-	-	-	-	++	-	+	+	-	-	-	-	-	+
Ettringite - $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ (JCPDS 41-1451)	++	-	-	-	-	+++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gesso - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (JCPDS 21-0816)	++	-	-	-	-	+	-	+	+	++	-	-	++	-	-	-	-

Tabella 11 Riassunto dei campioni di malta ritenuti più significativi prelevati presso l'albergo Dorando ed alcuni fiumi in provincia di Bologna e Modena, a cui va aggiunto il fiume Po. ++++ = molto abbondante, +++ = abbondante, ++ = presente, + = tracce, - = assente.

[illegible]

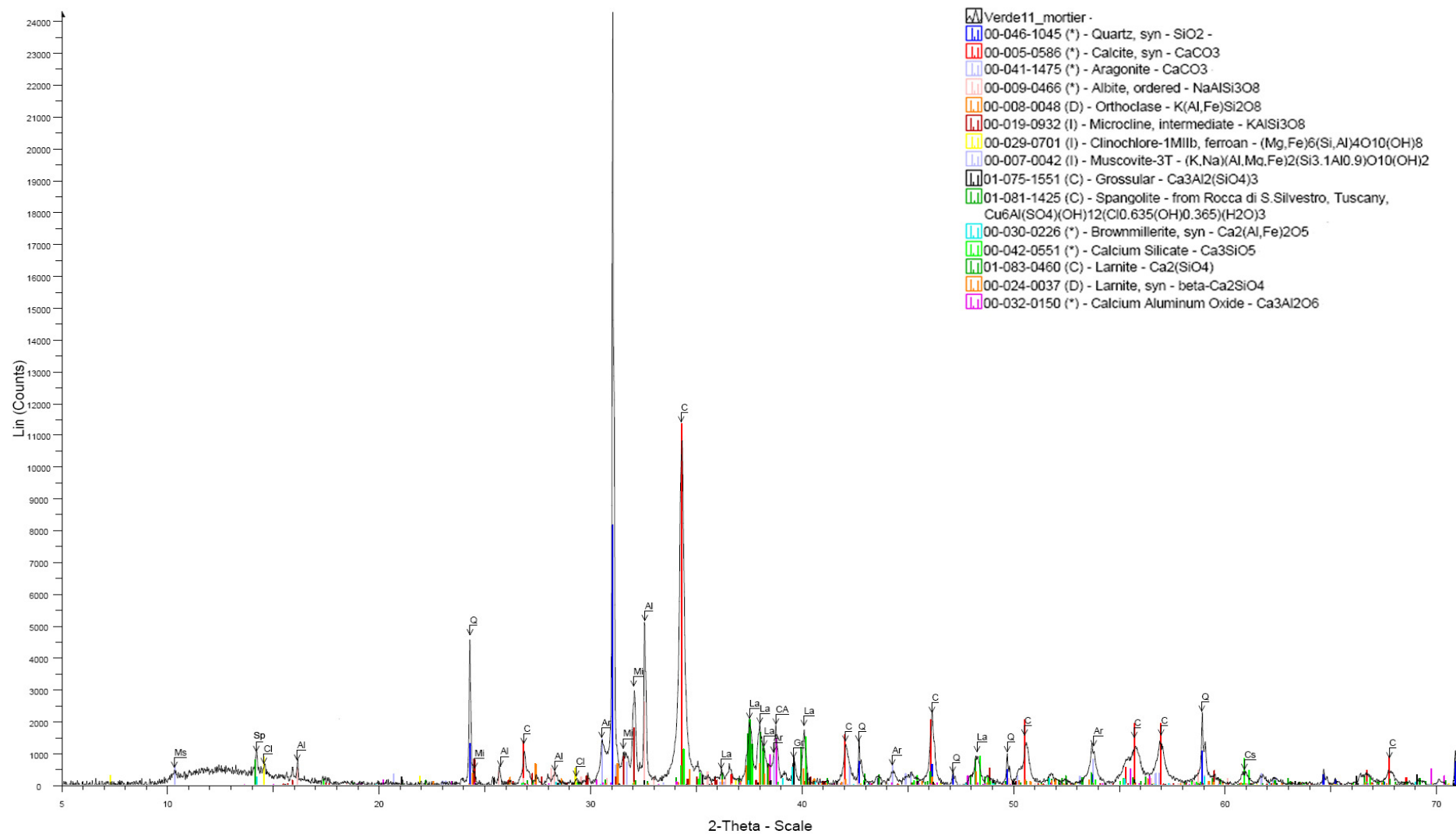


Figura 128 Diffrattogramma del campione V11.

Questo vale in particolare per i campioni D3 e V1, rispettivamente un frammento della base di una colonna vicino al marciapiede ed un frammento di decoro floreale della balaustra su via S. Mamolo con crosta nera in superficie. L'ettringite è stata individuata invece solo nei campioni di villa Gina ed in particolare in zone come la cornice del balcone principale.

Gli stucchi prelevati presso i locali interni di villa Verde (campioni V7 e V8) presentano come unica fase il gesso, in particolare il campione V8 presenta anche quarzo (molto presente), calcite (presente) ed albite (tracce) a dimostrazione del fatto che in questo caso sono stati aggiunti anche degli aggregati.

Il campione macinato per la diffrazione è stato riutilizzato anche per le analisi termogravimetriche (TA Instruments Thermogravimetric Analyzer Q50, analisi condotta in azoto). Da queste analisi risulta come i campioni prelevati risultino tutti carbonatati (ad eccezione del campione G2 che presenta il tipico picco della portlandite) e non presentino al loro interno tracce di sostanze organiche (come i consolidanti). Infine la termogravimetria ha sostanzialmente confermato la diffrazione per quanto riguarda la presenza di gesso, individuandolo negli stessi campioni (G3, G11, G15, G17, V1, V5, D1, D3). Negli stucchi in gesso prelevati all'interno di villa Verde, oltre ovviamente al gesso, è stata individuata anche in questo caso della calcite (Figura 130), a dimostrazione di una possibile aggiunta di aggregato o di calce aerea nel legante.

TGA

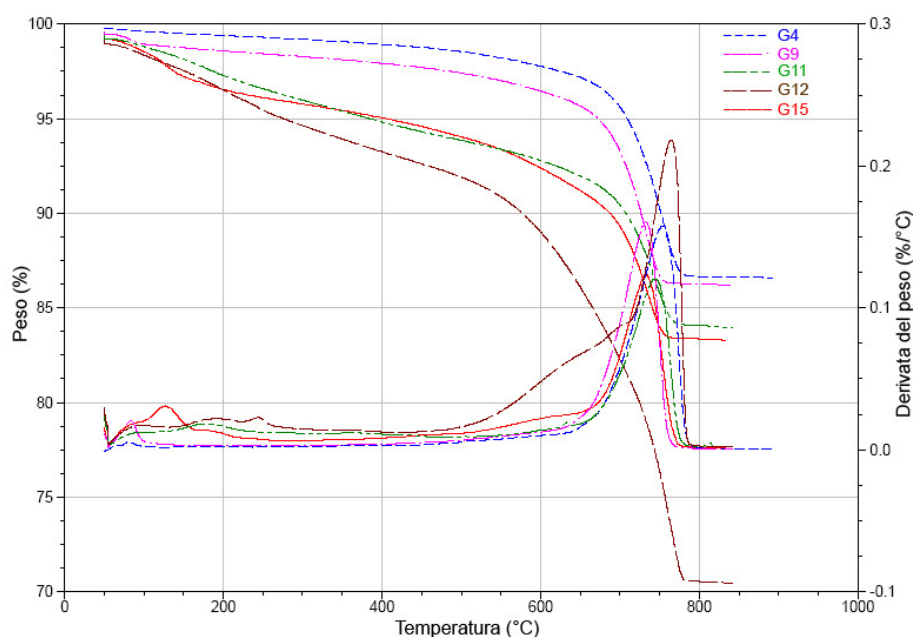


Figura 129 Termogravimetrie dei campioni più significativi di villa Gina a Bologna.

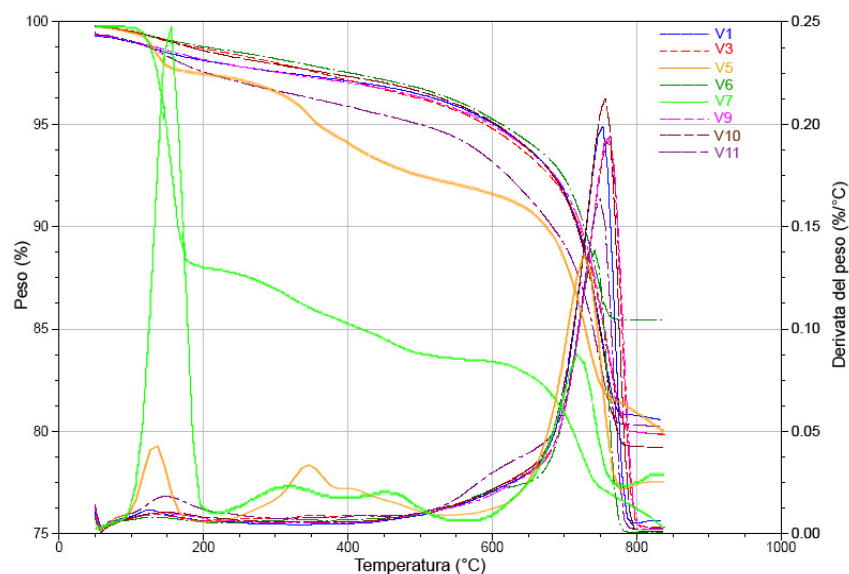


Figura 130 Termogravimetrie dei campioni di villa Verde a Bologna.

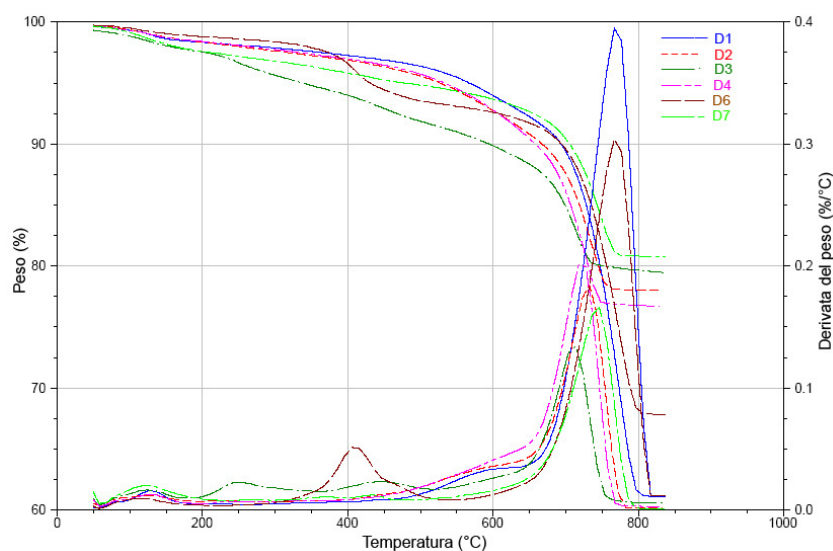


Figura 131 Termogravimetrie dei campioni dell'ex albergo Dorando a Carpi.

Microscopia ottica

I campioni osservati al microscopio ottico su sezioni lucide hanno permesso di stabilire meglio la natura del legante, grazie allo studio dei grani anidri, che spesso non vengono individuati dal diffrattometro in quanto presenti in quantità inferiore alla soglia minima del 3% riscontrata per il tipo di strumento utilizzato. La maggior parte dei campioni ha presentato infatti un quantitativo significativo di grani anidri, solo in pochi casi questi sono risultati scarsi o quasi completamente idratati (V4, V9, V10, D4). In seguito, per brevità, verranno riportati soltanto alcuni dei grani anidri ritenuti più significativi tra tutti quelli trovati in ciascuna sezione lucida. Va infatti sottolineato che per poter caratterizzare il legante non è sufficiente individuare un solo grano anidro, ma è

necessario individuarne diversi con caratteristiche molto simili tra loro. Da tale analisi risulta come tutti in tutti i campioni di malta prelevati sia stato utilizzato come legante del cemento cotto ad elevate temperature, probabilmente Portland. Solo nel campione G12, la presenza di grani anidri di grosse dimensioni (fino a 200 μ m) e di cristalli di belite del tipo II (una serie di strisce, Figura 132), lasciano pensare che il campione possa essere in realtà della calce eminentemente idraulica, alla luce anche della sua colorazione biancastra dopo la lucidatura. In tutti gli altri casi sono stati identificati cristalli di alite di forma spigolosa (per lo più esagonale), di colore marrone o con sfumature blu/gialle a seconda del tempo di esposizione all'attacco con borace (Figura 133), insieme a cristalli di belite del tipo I (due serie di strisce, Figura 134) tipicamente rotondeggianti. Anche la dimensione dei cristalli all'interno dei grani fa supporre che la temperatura di cottura del legante fosse particolarmente alta. La fase interstiziale è quasi sempre scarsa e saltuariamente ben separata (ovvero con una netta separazione tra il C₃A ed il C₄AF, avvenuta a seguito di un rapido raffreddamento del clinker), in alcuni casi è possibile anche trovare all'interno delle impurità sotto forma di fasi puntiformi raggruppate tra loro, Figura 135. Nel campione G10 (Figura 136) è possibile individuare chiaramente i 3 strati che compongono la sezione del cordolo del balcone: uno strato esterno di colore più scuro, uno intermedio di colore grigio ed uno interno di colore più chiaro. Tra questi 3 strati quello interno presenta il maggior numero di grani anidri. In particolare, per quanto riguarda villa Gina, è interessante notare come le malte utilizzate per la realizzazione delle formelle con i motivi del papiro presentino grani anidri molto abbondanti con cristalli di alite e belite di tipo I chiaramente visibili all'interno, confermando come l'utilizzo del cemento per questo tipo di decorazioni fosse in auge già a partire dal 1900. Tale conclusione può essere confermata anche per quanto riguarda villa Verde, infatti i campioni V3 e V11 rappresentativi di decorazioni floreali lungo la balastra su via S. Mamolo, presentano le stesse caratteristiche di quelli appena descritti: grani anidri presenti in numero significativo, cristalli di alite e belite del tipo I ben sviluppati e fase interstiziale scarsa e ben separata (con il C₄AF spesso in forma di lamelle). Anche il campione V6 è a base cementizia. Nel campione V11, oltre allo strato pittorico superficiale, sono presenti due strati di malta differenti: quello esterno più chiaro e quello interno più scuro. La presenza di uno strato esterno di diversa colorazione non esclude la possibilità di un intervento successivo di ripristino e successiva tinteggiatura. La presenza di strati di malta differente è risultata evidente in particolare con il campione D7 (Figura 137). In tale sezione è stato possibile osservare

al disotto dello strato pittorico di colore giallognolo la presenza di due strati di malta completamente diversi: nella parte alta uno strato compatto di colore grigio scuro, mentre nella parte bassa alla stessa profondità uno strato più chiaro quasi bianco. Al di sotto di questi strati è stato rinvenuto uno strato di malta grigio scuro con aggregati più grossi. In tutti gli strati sono stati rinvenuti grani anidri contenenti cristalli di alite, ma nello strato compatto di colore grigio scuro la presenza di grani anidri era molto più elevata, al contrario gli aggregati erano molto più piccoli e scarsi. La presenza dello strato pittorico è visibile inoltre anche nei campioni D3 e D4. Il campione D1 invece mostra una matrice di colore rossastro dentro al quale sono presenti, oltre agli aggregati, alcuni piccoli grani anidri (Figura 138). La colorazione della matrice, ad una osservazione al microscopio appare omogenea senza particolari *spot* colorati, per questo una ulteriore osservazione al SEM potrà chiarire a cosa è dovuto questo particolare effetto cromatico.

Le fotografie ottenute al microscopio ottico a 50x sono servite per determinare la percentuale di aggregato presente nella malta. Attraverso il *software* AutoCad® è stato possibile calcolare l'area dell'aggregato, Figura 139. L'operazione è stata poi ripetuta per ogni campione su almeno 5 foto diverse ed in seguito si è calcolata la media tenendo conto della porosità precedentemente calcolata attraverso porosimetria ad intrusione di mercurio. In Tabella 12 si riportano i risultati ottenuti. La finezza degli aggregati è da imputare al fatto che i campioni prelevati riguardano strati superficiali di malta, normalmente più fini di quelli interni, come visto anche nei capitoli precedenti.

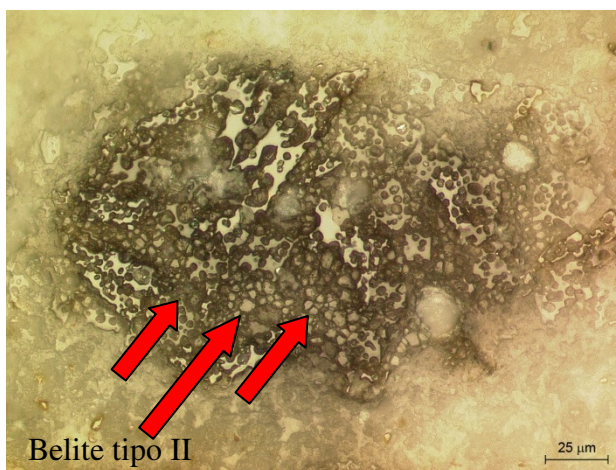


Figura 132 Campione G12, piccoli cristalli di belite.

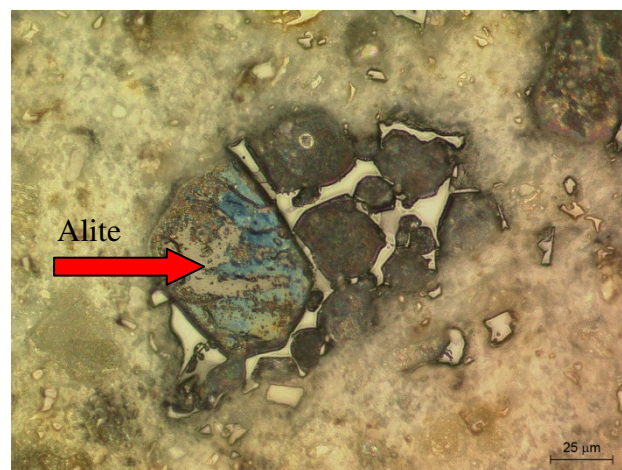


Figura 133 Campione D7, grosso cristallo di alite.

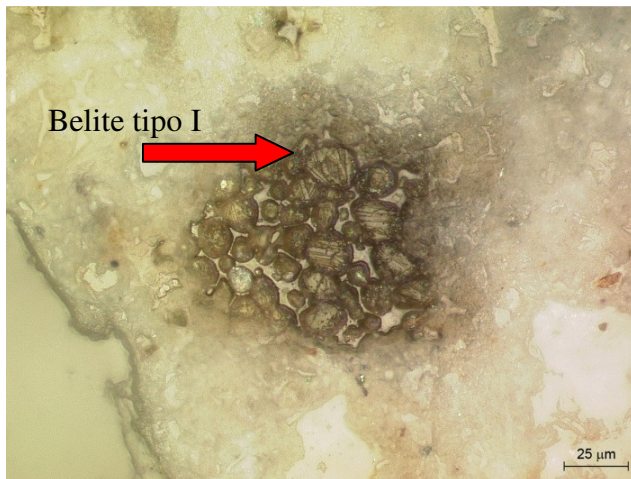


Figura 134 Campione G17, cristalli di belite del tipo I.

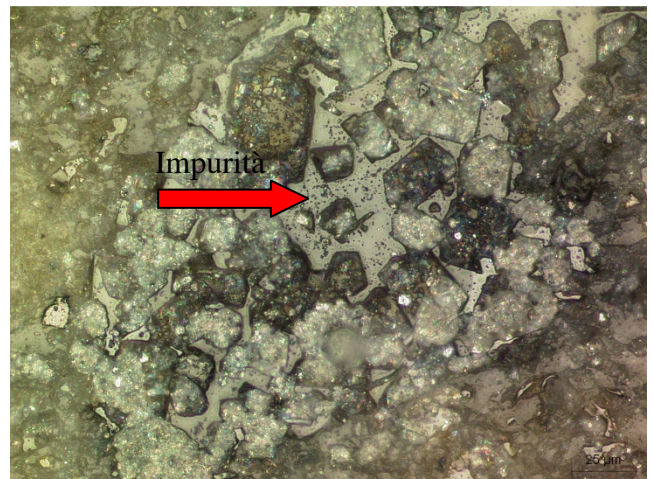


Figura 135 Campione G14, impurità nella fase interstiziale.

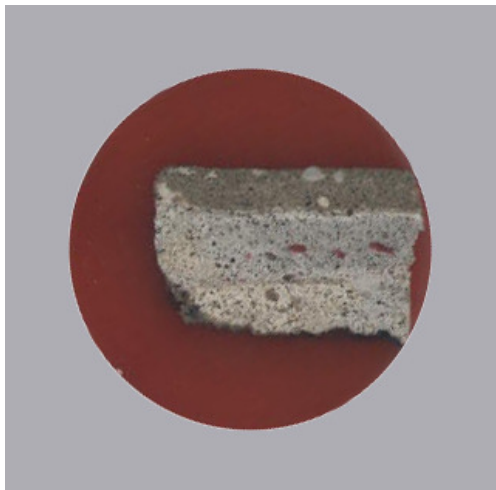


Figura 136 Campione G10 in sezione lucida.

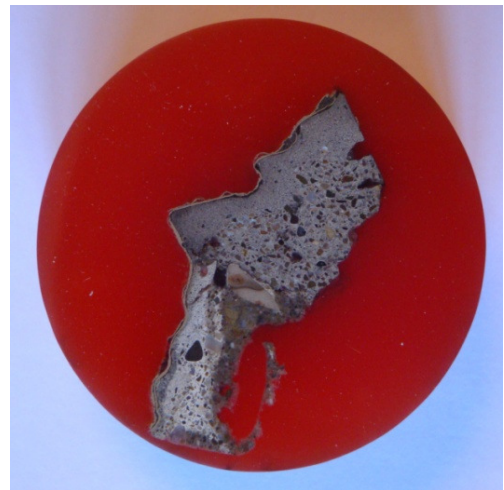


Figura 137 Campione D7 in sezione lucida.

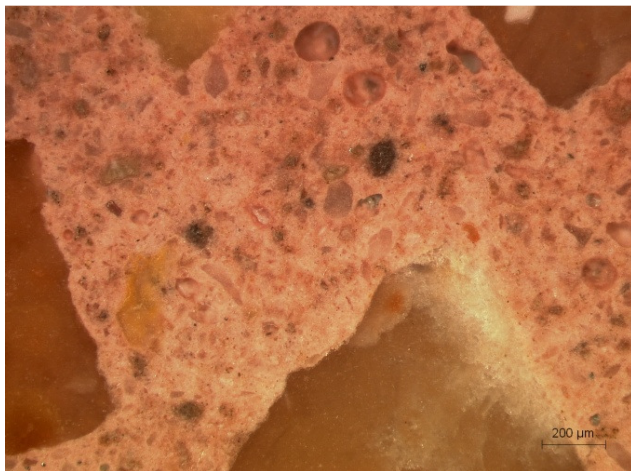


Figura 138 Campione D1, matrice di colore rossastro con aggregati di quarzo e piccoli grani anidri.

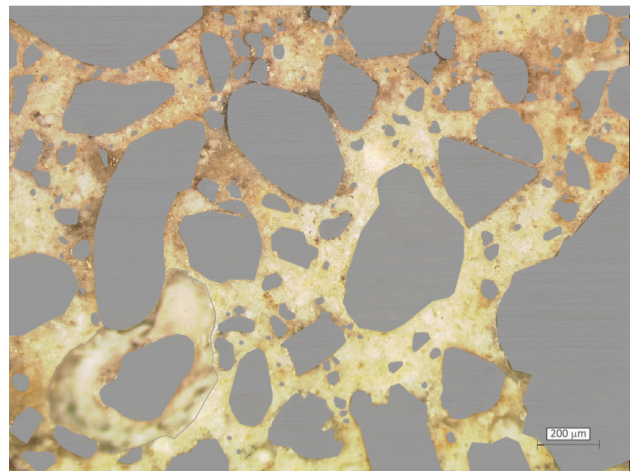


Figura 139 Campione V3, area degli aggregati colorata in grigio.

Tabella 12 Percentuale di aggregato e diametro massimo dei campioni di villa Verde.

Campione	vol. % aggregato	Φ max. [mm]
V3	66%	1,1 mm
V4	41%	0,6 mm
V6	61%	0,9 mm
V9	32%	1,0 mm
V10	25%	0,4 mm
V11	45%	0,8 mm

SEM

I campioni preparati in sezione lucida sono osservati successivamente anche al SEM (JEOL – JSM 5600 LV) per potere eseguire analisi puntuali sui grani anidri precedentemente individuati al microscopio ottico a 500x. I campioni quindi sono stati opportunamente preparati rivestendo la sezione di nastro biadesivo al carbonio, per migliorare la qualità dell'immagine con gli elettroni retrodiffusi. In tutti i campioni sono stati individuati grani anidri con cristalli di alite e belite, confermando quindi quanto già visto al microscopio ottico. In particolare, eseguendo un'analisi puntuale EDS su di un cristallo di alite, questa presenterà un picco più basso di silicio rispetto al calcio (Figura 140), dal momento che ha un rapporto Ca/Si pari a 3 contro un rapporto pari a 2 della belite. Anche per la fase interstiziale, il SEM conferma sostanzialmente le osservazioni al microscopio ottico individuando due fasi distinte: una grigia (C_3A) ed una bianca (C_4AF) ricca in ferro. In alcuni casi, è stato possibile identificare anche la presenza di periclasio (MgO) all'interno del grano. Nei campioni G11 e V11 sono stati rilevati cristalli aghiformi di ettringite. In particolare il G11, essendo stato preparato in sezione lucida, l'ettringite è ben visibile all'interno della matrice cementizia, al contrario per il campione V11 l'ettringite è stata individuata solo all'interno dei pori del campione preparato in superfici di frattura (Figura 141). L'analisi EDS in entrambi i casi rivela la presenza di calcio, alluminio e zolfo. Eseguendo inoltre un'analisi puntuale sugli aggregati nei campioni in superfici di frattura è stato possibile confermare la presenza di feldspati (già individuati tramite diffrattometria) in quanto i picchi principali sono stati quelli di calcio, alluminio, magnesio, potassio e ferro. Sempre nei campioni preparati in superficie di frattura è stato possibile osservare la microstruttura della matrice legante della malta, che nella maggior parte dei casi è risultata completamente carbonatata (come confermato già dalle prime analisi con fenoltaleina). Conseguentemente non è stato possibile individuare cristalli di C-S-H, ma solo una fase omogenea ricca in calcio e silicio. Solo nei campioni V9 e V10 sono state riscontrate alcune forme cristalline regolari, sebbene senza tracce di silicio. Infine per campioni D1 e V11 sono state

eseguite alcune cartografie con lo scopo di chiarire alcuni aspetti che non era stato possibile risolvere con l'utilizzo della sola diffrattometria. Per il campione D1 il problema ha riguardato l'individuazione della sostanza che rende rossa la matrice del legante, mentre per il campione V11 il tipo di pigmento utilizzato per la pittura gialla. Nel primo caso la cartografia ha rilevato una grossa concentrazione di zolfo (dovuto all'inquinamento atmosferico, Figura 142) ed aggregati composti da silicio, alluminio, magnesio, e sodio (probabilmente i feldspati che la sola diffrattometria non era riuscita ad individuare). Anche la presenza di cloro è rilevante, ma non essendo concentrato in *spot*, non lo si ritiene la causa principale della colorazione rossa. Solo con un'analisi puntuale EDS è stato possibile individuare punti ricchi in calcio e ferro che potrebbero essere l'effettiva causa di questa particolare colorazione.

Nel campione V11, la presenza di titanio nello strato superficiale risulta evidente (Figura 143), ma questo non fornisce informazioni sul tipo di pigmento utilizzato dal momento che il rutilo (ossido di titanio) compone la base per tutte le pitture odierne, non solamente quelle di colore bianco. Gli altri elementi presenti sono risultati: calcio, silicio, alluminio, ferro, magnesio, sodio e zolfo. Il fatto che non siano stati riscontrati altri elementi e che la termogravimetria dello strato pittorico mostra due perdite di peso intorno ai 350°C e 400°C, lasciano supporre che il pigmento aggiunto sia di natura organica (Figura 144).

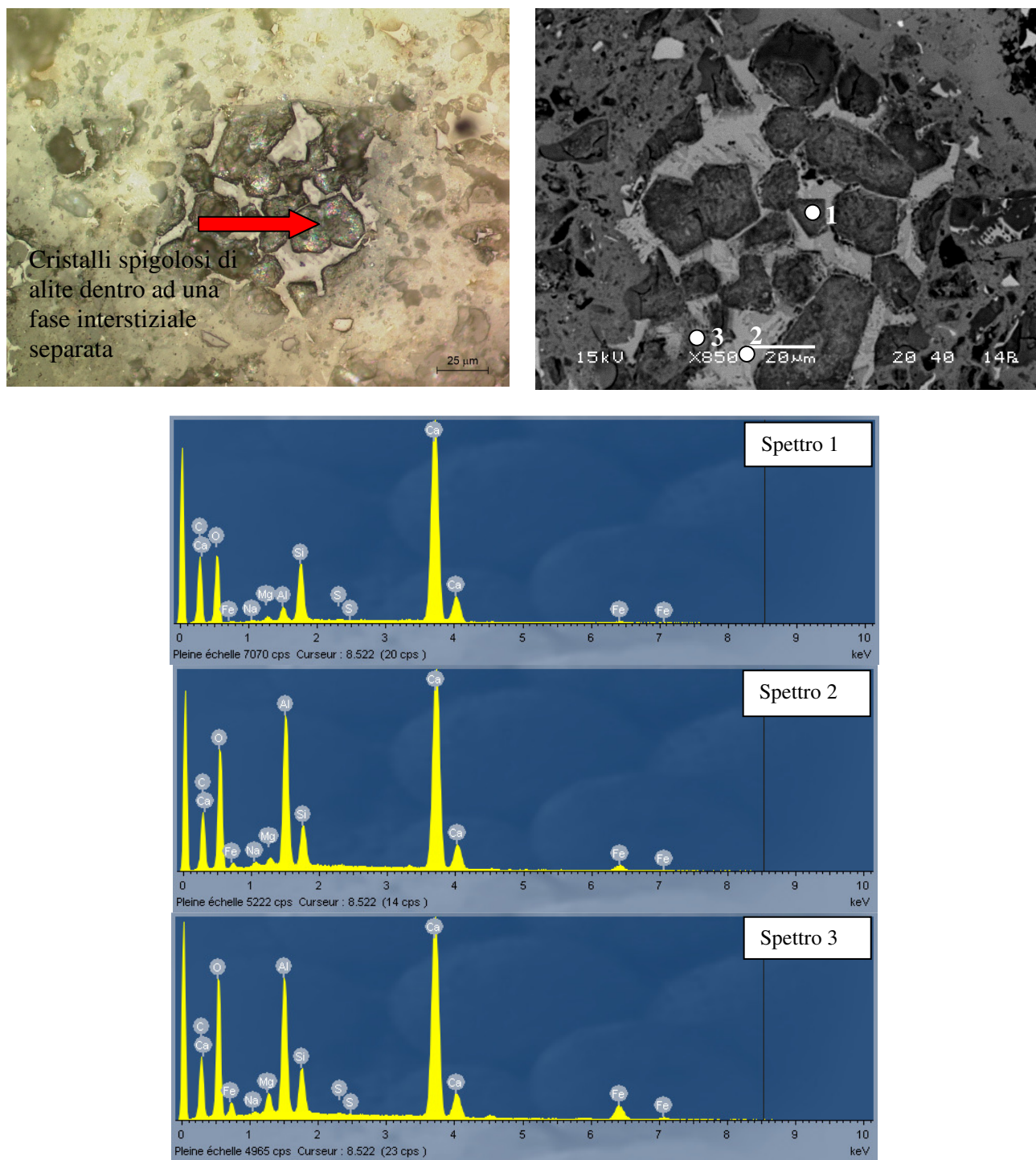


Figura 140 Grano anidro all'interno del campione V11 osservato rispettivamente al microscopio ottico (a sinistra) e con il SEM (a destra). Sotto le rispettive analisi EDS dei punti 1,2 e 3.

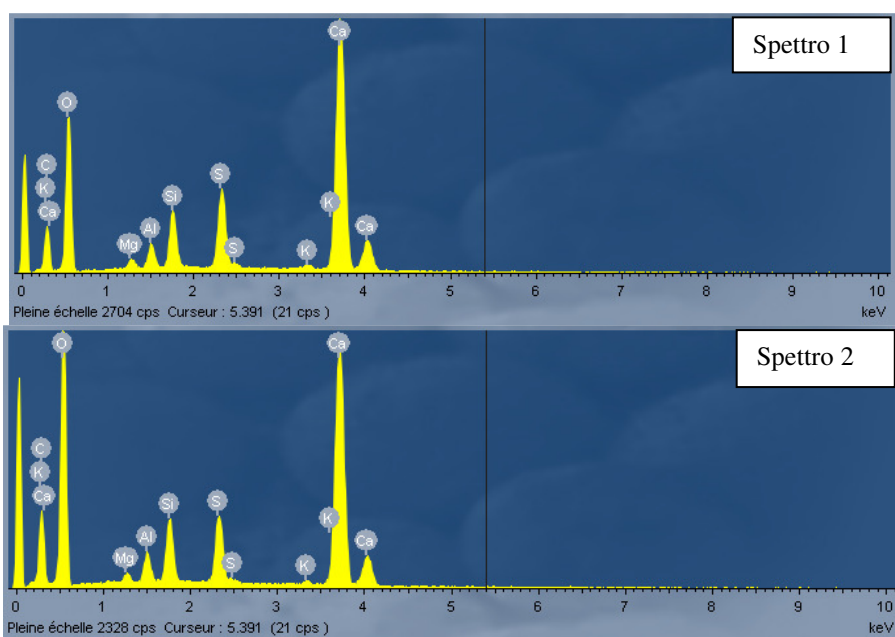
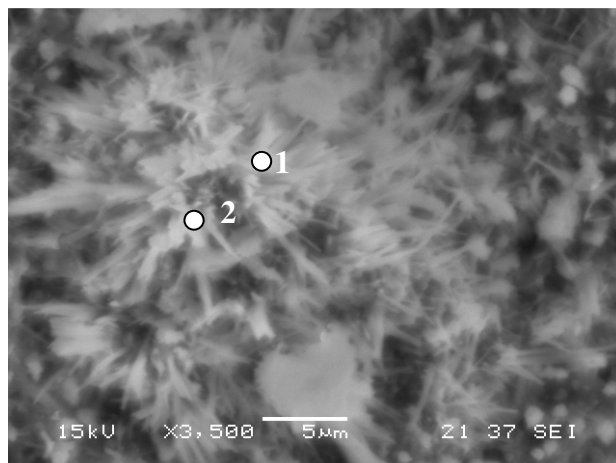
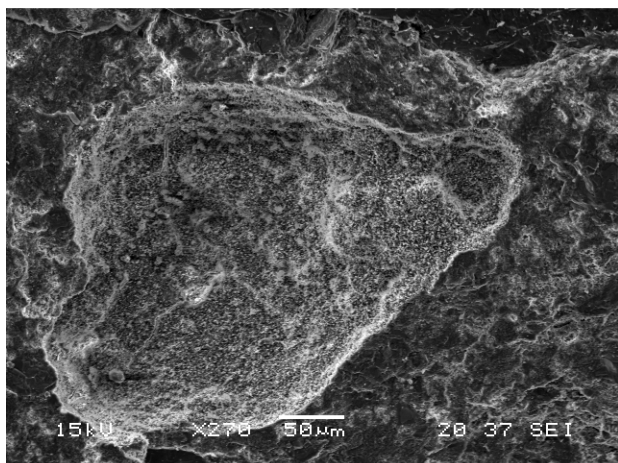


Figura 141 Ettringite osservata all'interno del campione V11. Al di sotto le rispettive analisi EDS.

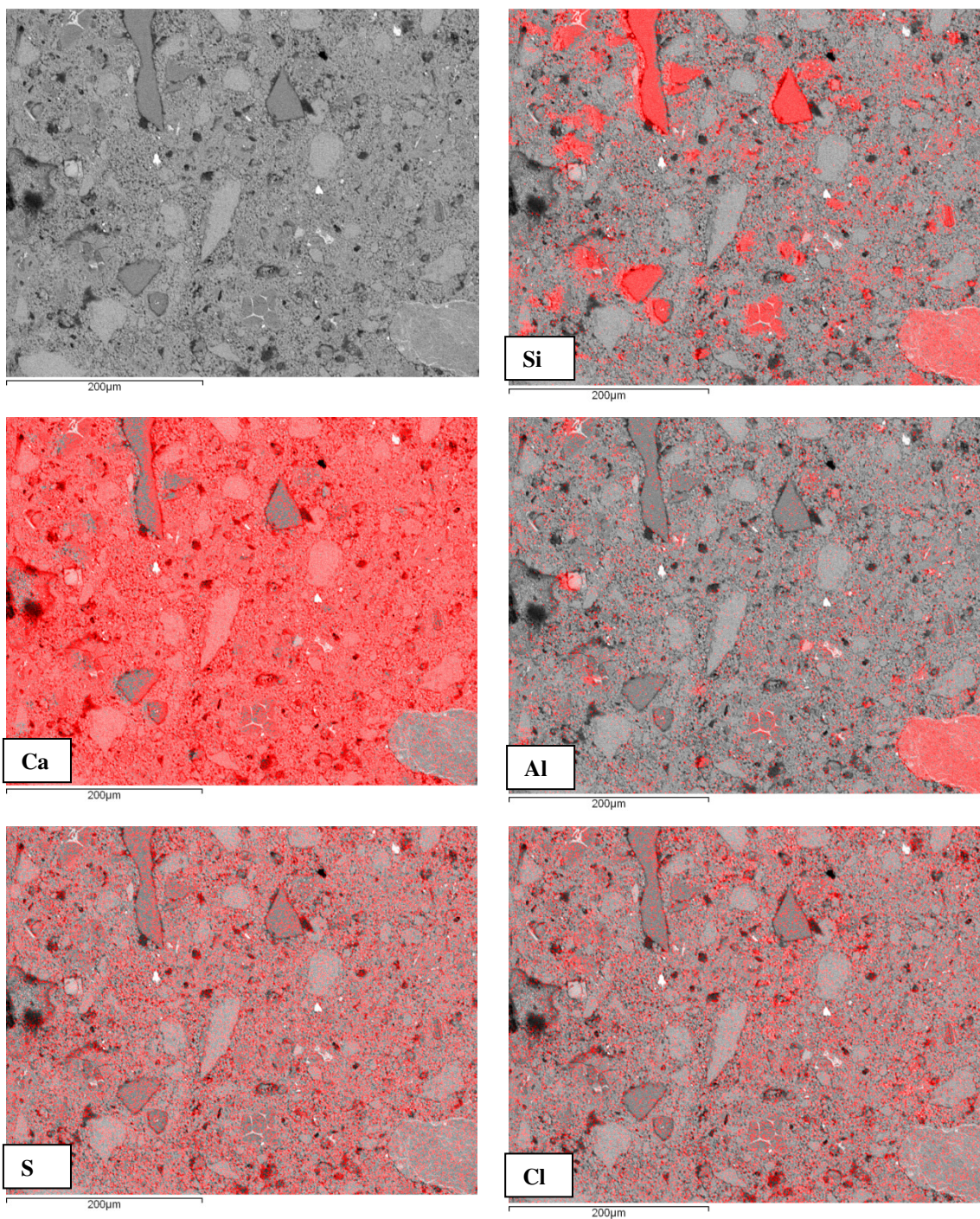


Figura 142 Riassunto delle cartografie ritenute più significative eseguite sulla sezione lucida del campione D1.

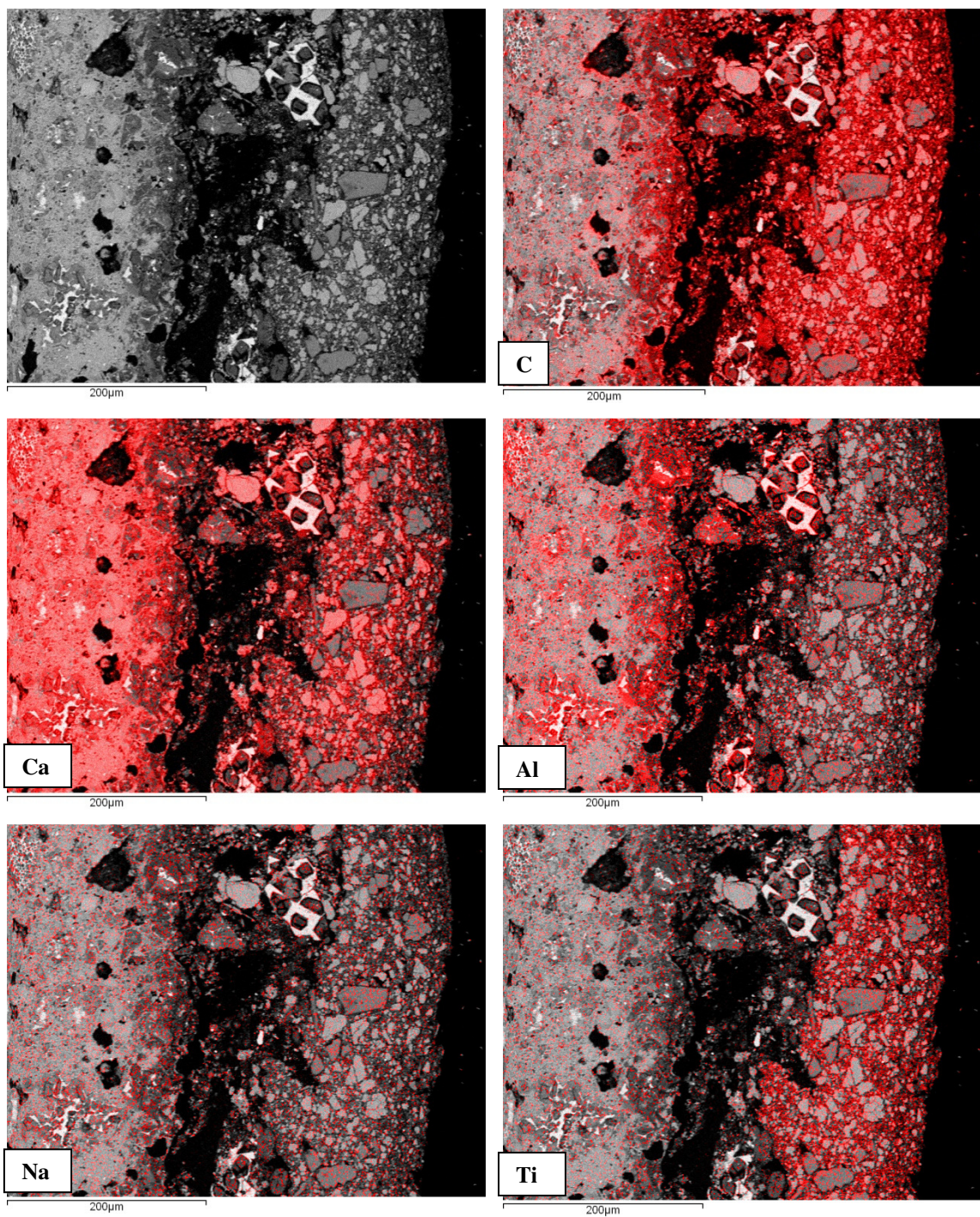


Figura 143 Riassunto delle cartografie ritenute più significative eseguite sulla sezione lucida del campione V11.

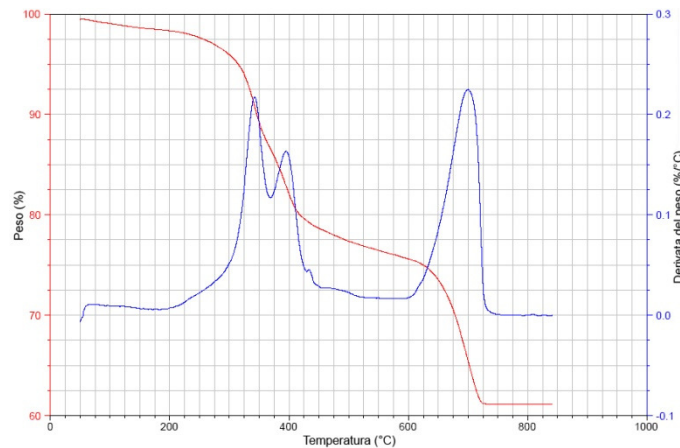


Figura 144 TGA dello strato pittorico del campione V11.

MIP

Le analisi porosimetriche (unità di macropori Fisons 120 ed un porosimetro Carlo Erba 2000, con software Milestone 200) condotte sui campioni prelevati hanno rilevato complessivamente valori di porosità aperta molto variabili tra loro anche tra elementi architettonici dello stesso tipo e prelevati dallo stesso edificio (Tabella 13). Anche la distribuzione dei pori risulta particolarmente variabile (Figura 145). Nei campioni prelevati presso villa Gina le porosità maggiori sono state riscontrate negli intonaci (G4, G9), mentre i cordoli del balcone (G11) ed il colonnino parapetto (G12) hanno presentato porosità inferiori (-5/10%). Tale riduzione di porosità è spiegabile con il fatto che le malte siano state volutamente preparate in questo modo per far fronte all'azione dell'acqua e del gelo, visto il ruolo di scolo svolto da tali elementi, oppure con il fatto che per avere delle cornici tirate a modano sia necessaria una malta piuttosto densa e dalla consistenza plastica. Nelle decorazioni a stampo prelevate presso villa Verde la porosità è altamente variabile: dai campioni V1 e V11, con una porosità rispettivamente del 10,5% e del 9%, si passa ai campioni V3 e V9 con una porosità del 20,9% e del 25,8%. I risultati ottenuti dalle decorazioni più porose erano largamente attesi dal momento che per i decori realizzati a stampo si preparavano con malte più fluide per riempire uniformemente lo stampo, con la conseguenza di un prodotto finale più poroso. Conseguentemente non si esclude la possibilità che i campioni con porosità inferiore possano essere porzioni di interventi di recupero successivi che lo strato di vernice superficiale può avere celato. Risultano invece leggermente più omogenei i risultati dei cordoli dei parapetti (15,9% quello esterno su via San Mamolo e 23,1% quello del balcone al piano rialzato). Confrontando invece i valori di porosità aperta riscontrati presso l'albergo Dorando si evince come tutti i decori abbiano una porosità compresa tra il 14% ed il 20%, sebbene rimangano forti disomogeneità nella distribuzione dei

pori. Risulta quindi evidente come sia necessaria una formulazione specifica per ogni tipologia di elemento architettonico individuata all'interno di ciascun edificio, al fine di assicurare una migliore compatibilità meccanica con il supporto che, come nei casi esaminati, risulta molto variabile.

Tabella 13 Riassunto delle porosimetrie eseguite sui campioni.

Campione	Porosità aperta (%)	Raggio medio dei pori (μm)	Campione	Porosità aperta (%)	Raggio medio dei pori (μm)
G4	23,8%	6,28 μm	V9	25,8%	0,08 μm
G9	18,7%	0,45 μm	V10	23,1%	0,54 μm
G11	6,2%	0,02 μm	V11	9,0%	0,004 μm
G12	4,4%	0,004 μm	D1	16,1%	0,10 μm
G13	15,2%	0,61 μm	D2	17,1%	0,92 μm
G14	15,5%	1,34 μm	D3	13,7%	29,68 μm
V1	10,5%	1,04 μm	D4	17,2%	0,54 μm
V3	20,9%	41,19 μm	D6	20,4%	2,37 μm
V6	15,9%	0,01 μm	D7	15,2%	0,02μm

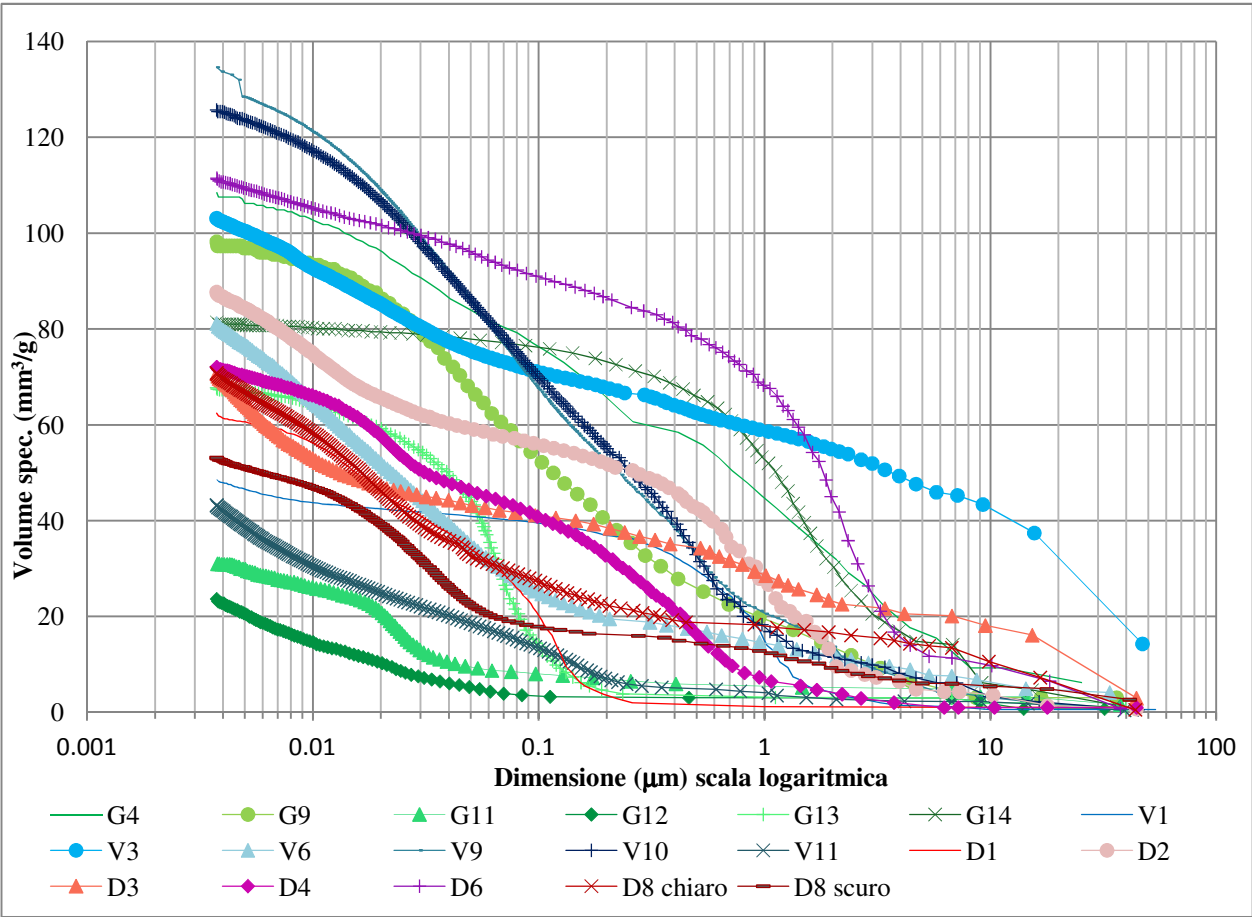


Figura 145 Riassunto delle porosimetrie eseguite sui campioni.

Parte 5 – Formulazione di malte compatibili

5.1 Formulazione di malte compatibili per villa Verde

Villa Verde è stato considerato l'edificio il più significativo tra quelli analizzati in quanto i restauri, che sono attualmente in corso, permetteranno in un futuro prossimo di testare le formulazioni ritenute più compatibili, anche grazie alla collaborazione con l'impresa che esegue materialmente i restauri. Per questo motivo si è cercato di individuare per villa Verde una formulazione che permettesse di restaurare le pietre artificiali che compongono la balaustra lungo via S. Mamolo ed il terrazzo principale al piano rialzato.

Va inoltre sottolineato come tali decorazioni saranno restaurate senza la sostituzione degli elementi danneggiati, ma tramite la pulitura e stuccatura delle sole porzioni danneggiate. Questo fa sì che la formulazione non debba essere idonea al colaggio (come nel caso della ricostruzione di nuovi elementi architettonici), ma bensì debba essere progettata in base alle esigenze che ha l'operatore durante le operazioni di stuccatura e della compatibilità con il supporto precedente.

A tal fine sono stati preparati alcuni impasti di malta variando sia il tipo di legante che il quantitativo di acqua. Il diametro massimo dell'aggregato e la sua percentuale all'interno della malta sono stati fissati in base a quanto osservato con il microscopio ottico nei campioni di villa Verde (cap. 4.2). Anche la natura dell'aggregato è stata fissata tenendo conto sia delle diffrattometrie (che hanno riscontrato feldspati presenti anche nelle sabbie di fiume campionate), sia delle immagini al microscopio ottico che mostrano un aggregato rotondeggiante e quindi compatibile con l'ipotesi che sia di origine fluviale (in particolare del fiume Reno, essendo quello più vicino e quindi più facilmente raggiungibile).

Per garantire la durabilità dell'intervento e per evitare la formazione di ulteriori fenomeni di degrado nella malta storica, le malte di ripristino dovranno presentare una buona compatibilità con il supporto, in termini di proprietà di trasporto (permeabilità al vapor d'acqua maggiore del supporto) e di proprietà meccaniche (modulo di elasticità uguale o inferiore a quello del supporto). Le malte devono inoltre resistere alle principali sollecitazioni (ad esempio il ritiro deve essere basso), garantire una buona lavorabilità allo stato fresco, al fine di ripristinare le complesse geometrie dei decori floreali, e devono avere una colorazione simile all'originale, anche se nei casi esaminati

quest'ultimo aspetto assume una minore importanza dal momento che le pietre artificiali risultavano tinteggiate già in origine. Tenendo conto di queste problematiche sono stati preparati 15 impasti: 3 con calce idraulica NHL5, 6 con cemento Portland II/B-LL e 6 malte a base di una miscela di calce idraulica HL2,5 e cemento Portland II/B-LL in percentuali variabili (40% - 50% - 60% di OPC). Le indicazioni sull'esatta composizione delle malte sono riportate in Tabella 14. Le sigle scelte per i diversi impasti riportano in successione: il tipo di legante (PC, il cemento Portland II/B-LL; NHL5, la calce idraulica; B il legante misto cemento Portland – calce idraulica HL2,5), il rapporto acqua/legante e la percentuale di aggregato. Per le malte bastarde dopo il tipo di legante è indicata anche la percentuale di Portland. Per i vari impasti sono stati preparati dei travetti di malta (4x4x16cm) prendendo come riferimento la normativa UNI EN 196-1 per i tempi, la procedura di miscelazione e assestamento con tavola a scosse. Nel caso delle malte bastarde, in cui il legante è misto, la miscelazione tra cemento e calce idraulica è avvenuta prima dell'inizio dell'impasto.

Tabella 14 Ricette delle malte preparate.

nome campione	calce idraulica HL2,5 [g]	calce idraulica NHL5 [g]	CEM II/B-LL [g]	acqua [g]	sabbia < 1mm [g]	acqua/legante	% aggr. in peso
NHL5 0,4 - 40%	-	857	-	343	800	0,40	40%
NHL5 0,45 - 40%	-	827	-	373	800	0,45	40%
NHL5 0,45 - 50%	-	690	-	310	1000	0,45	50%
PC 0,4 - 40%	-	-	857	343	800	0,40	40%
PC 0,45 - 40%	-	-	828	372	800	0,45	40%
PC 0,43 - 50%	-	-	700	300	1000	0,43	50%
PC 0,45 - 50%	-	-	690	310	1000	0,45	50%
PC 0,47 - 50%	-	-	680	320	1000	0,47	50%
PC 0,45 - 60%	-	-	551	248	1200	0,45	60%
B 40%PC - 0,4 - 40%	514	-	343	343	800	0,40	40%
B 50%PC - 0,4 - 40%	428	-	428	343	800	0,40	40%
B 50%PC - 0,43 - 40%	420	-	420	361	800	0,43	40%
B 50%PC - 0,45 - 40%	413	-	413	373	800	0,45	40%
B 60%PC - 0,4 - 40%	343	-	514	343	800	0,40	40%
B 60%PC - 0,43 - 40%	336	-	503	361	800	0,43	40%

5.2 Caratterizzazione delle malte formulate per villa Verde

Le malte formulate per villa Verde e preparate come spiegato nel capitolo precedente sono state caratterizzate determinando la loro lavorabilità, il ritiro, la porosità, la permeabilità al vapor d'acqua, la resistenza a flessione e compressione ed il loro modulo elastico dinamico.

La determinazione della lavorabilità è stata condotta mediante l'impiego della tavola a scosse secondo quanto riportato nella normativa UNI 7044-72 e UNI EN 1015-3. In Figura 146 sono riportati i valori massimi di spandimento misurati dopo 15 colpi. I parametri che influenzano la lavorabilità sono il rapporto acqua/cemento e la percentuale di aggregato. Con l'aumentare del rapporto a/c aumenta la lavorabilità della malta, mentre con l'aumentare della percentuale di aggregato la lavorabilità diminuisce. Da tali analisi risulta evidente che le malte di cemento Portland sono risultate tutte molto fluide con una consistenza non sufficientemente plastica. Queste malte risultano quindi colabili ma poco modellabili e conseguentemente risulterà anche difficile risarcire le lacune nel caso di decorazioni complesse. Le malte a legante cementizio con una percentuale maggiore di aggregato (PC 0,45-60%) presentano invece il problema opposto: risultano troppo plastiche e tendono a formare grumi che rendono la malta quasi friabile. Risultano invece molto più modellabili le malte a base di calce idraulica e le malte bastarde con un basso contenuto di Portland proprio perché oltre ad avere un basso spandimento alla tavola a scosse, hanno anche una maggiore modellabilità legata alla maggiore presenza di idrossido di calcio.

Le resistenze a flessione e a compressione sono state determinate su travetti 4x4x16 cm secondo la normativa UNI EN 196-1 e UNI EN 1015-11, rispettivamente a 28 giorni e 60 giorni (Figura 147 - Figura 150). I campioni sono stati conservati a 20°C, 95% UR. La possibilità che una malta di ripristino si crepi o fessuri è legata ad alcuni parametri, tra cui: l'aumento della resistenza a compressione, del modulo elastico e del ritiro. I risultati mostrano una resistenza a compressione molto bassa a 28 giorni per le malte a base di calce idraulica NHL5 (4,9 MPa – 7,8 MPa), come quanto riportato dalla normativa UNI EN 459-1 (dopo 28 giorni $5\text{MPa} \leq R_c \leq 15\text{MPa}$) e dal produttore stesso. Del resto, uno dei motivi per cui sono state preparate anche delle malte bastarde, è stata proprio la necessità di avere una resistenza a compressione intermedia tra le calce idrauliche ed il cemento Portland. Le malte a base di cemento Portland hanno una resistenza a compressione a 28 giorni elevata, compresa tra 46,2 MPa e 60 MPa. Tale

variabilità è legata al diverso rapporto a/c ed alla diversa percentuale di aggregato. Le malte bastarde presentano invece una resistenza a compressione a 28 giorni compresa tra 22,9 MPa e 37,1 MPa, con una percentuale di aggregato costante (40%), ma con rapporti calce/cemento e acqua/legante variabili. Con l'aumentare di tali rapporti la resistenza meccanica diminuisce per tutte le malte preparate. Le resistenze meccaniche dopo 60 giorni risultano notevolmente aumentate per tutte le tipologie di malte, con un aumento maggiore di quelle idrauliche (+240%) rispetto a quelle a base di Portland (+90%) e quelle a legante misto (+100%). Per queste ultime l'aumento è strettamente legato alla percentuale di calce idraulica: gli impasti con più cemento presentano incrementi percentuali inferiori sebbene la loro resistenza in termini assoluti sia maggiore degli altri.

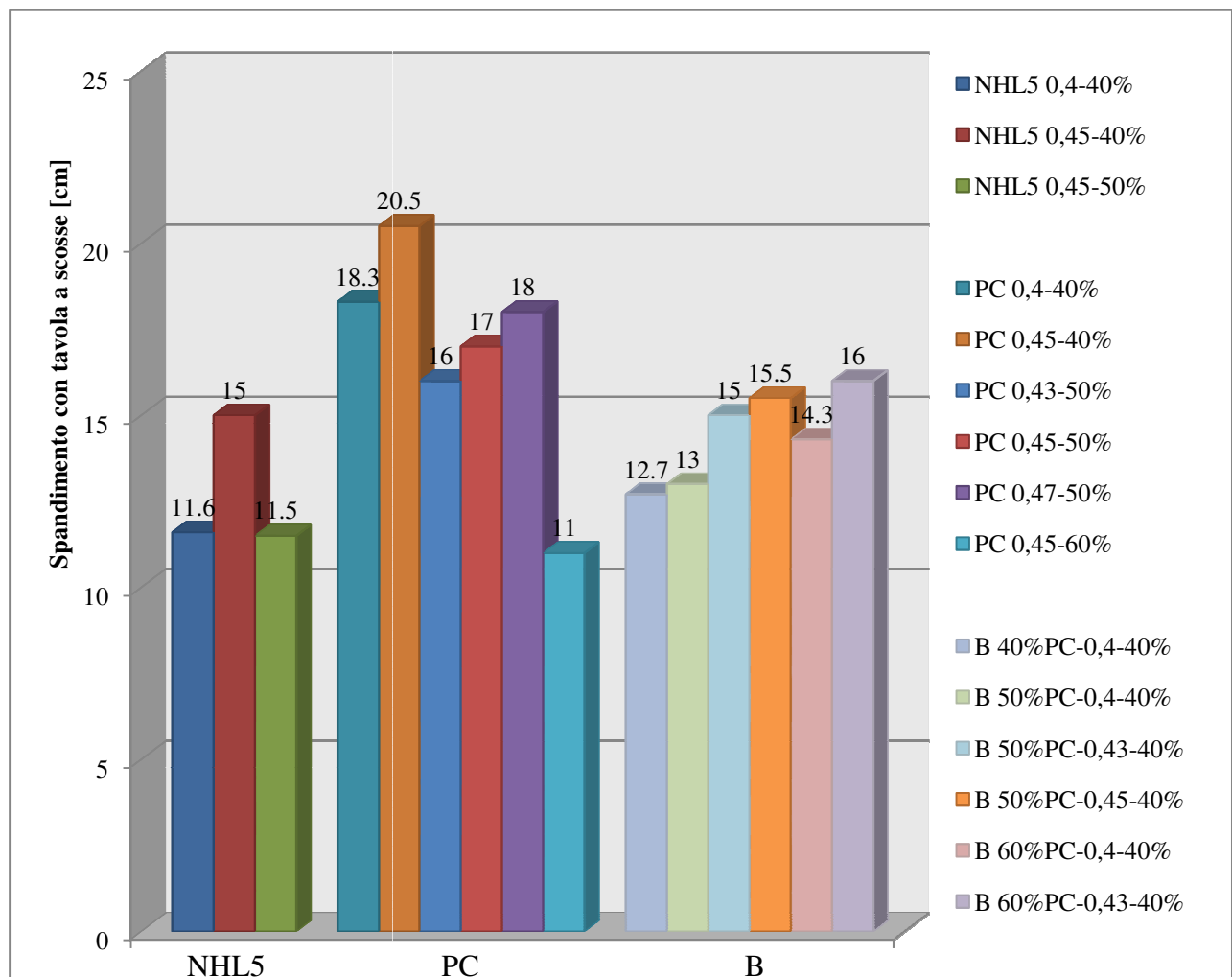


Figura 146 Determinazione della lavorabilità mediante l'impiego della tavola a scosse.

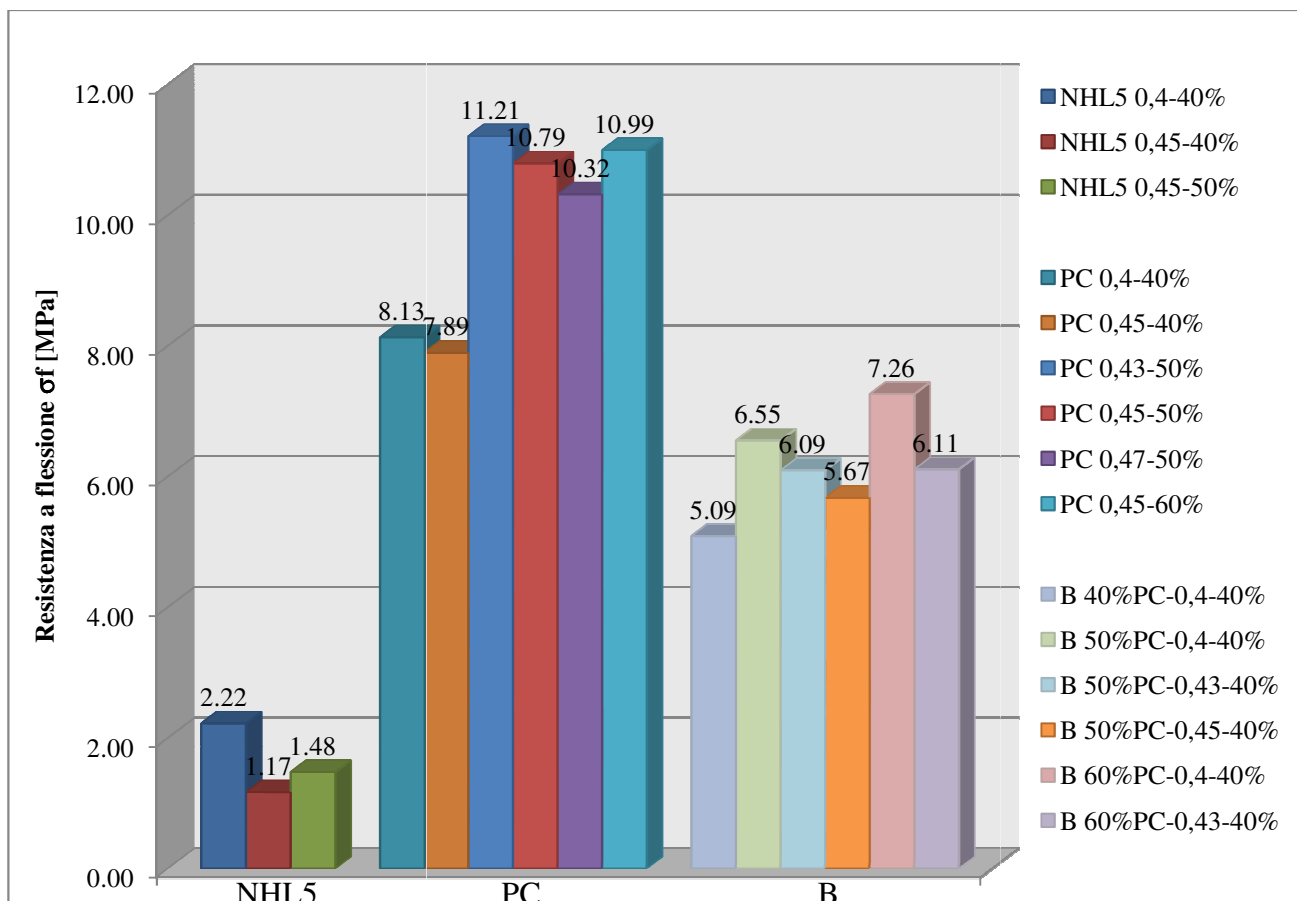


Figura 147 Resistenza a flessione a 28 giorni delle malte preparate.

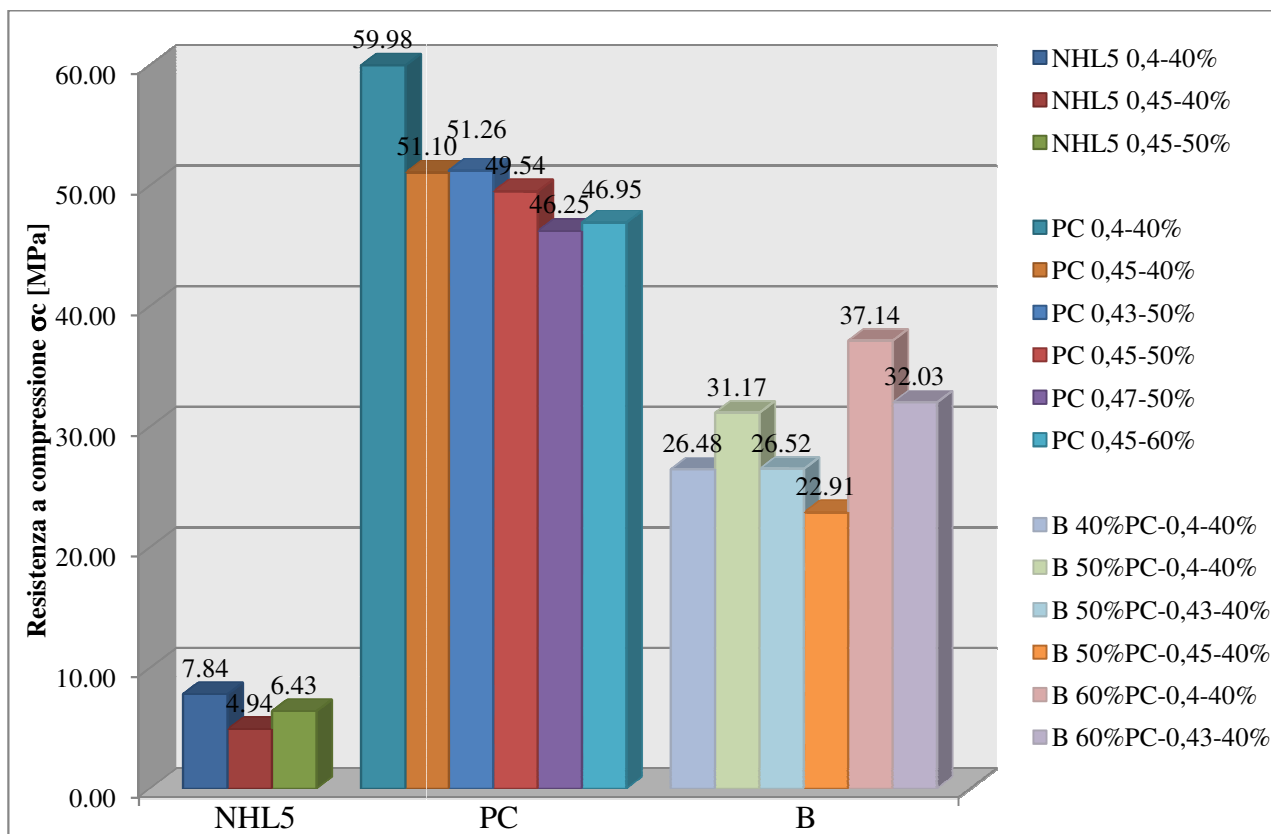


Figura 148 Resistenza a compressione a 28 giorni delle malte preparate.

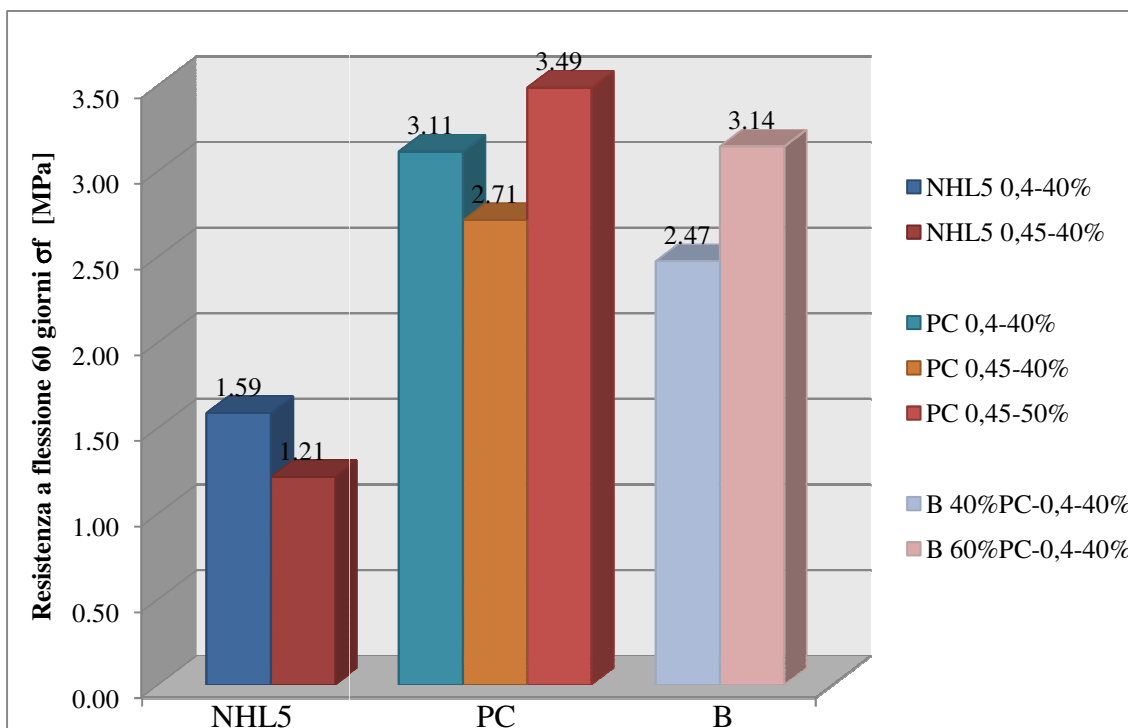


Figura 149 Resistenza a flessione a 60 giorni delle malte preparate.

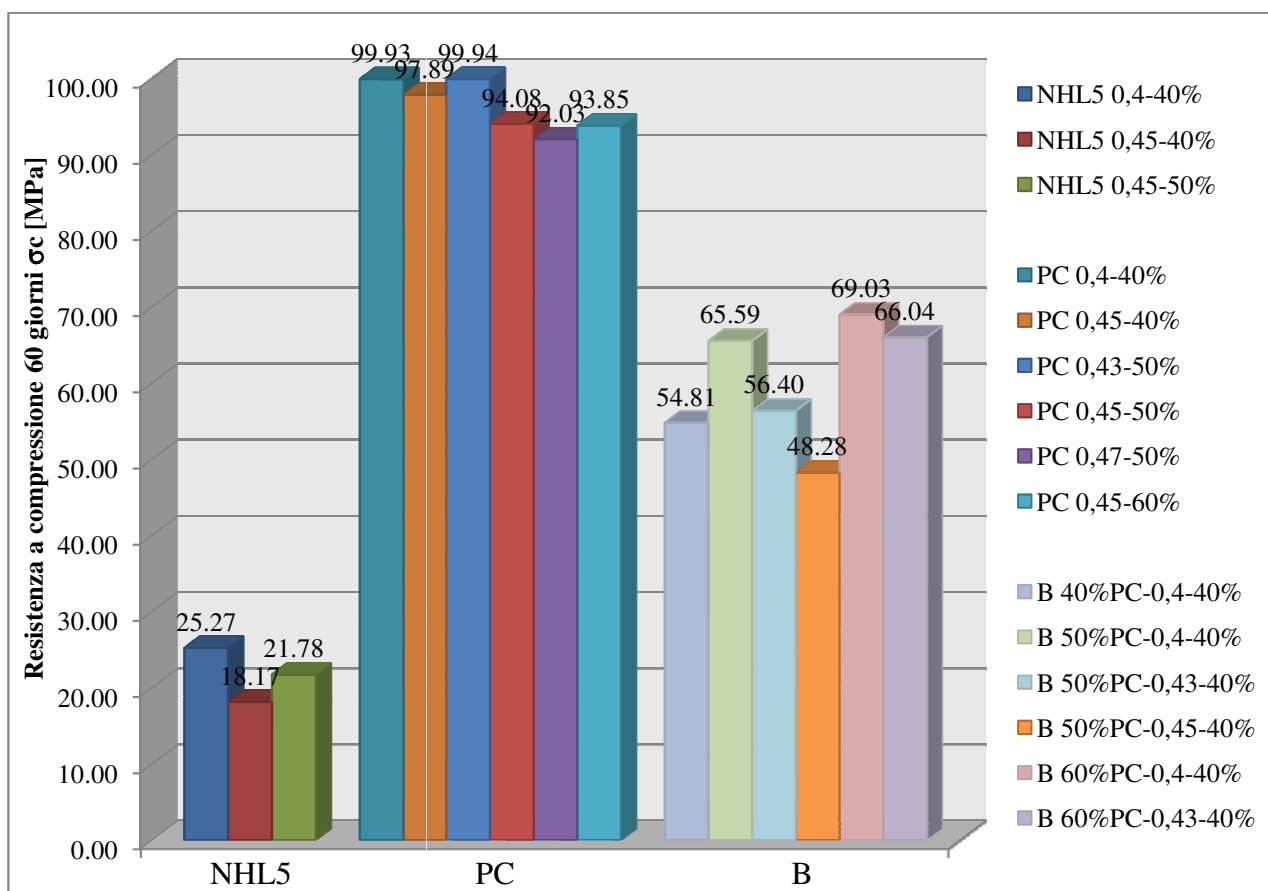


Figura 150 Resistenza a compressione a 60 giorni delle malte preparate.

Il modulo elastico dinamico è stato determinato con indagini ultrasoniche (UNI EN 12504-4) eseguite su travetti 4x4x16cm preparati per determinare la resistenza a flessione e compressione dopo 28 giorni di stagionatura. Il modulo elastico è stato ricavato dall'equazione seguente:

$$E = [(1+\nu)(1-2\nu)\rho \cdot v_m^2]/(1-\nu)$$

dove E è il modulo elastico dinamico (Pa), ν il coefficiente di Poisson (assunto pari a $\nu=0,2$), ρ la densità geometrica (kg/m^3) e V_m la velocità degli ultrasuoni (m/s).

Solo le malte a base di calce idraulica e quelle miste con percentuale di cemento Portland inferiore al 60% presentano un modulo elastico inferiore a 24 GPa, valore consigliato in letteratura come limite massimo per evitare la formazione di crepe e distacchi (124).

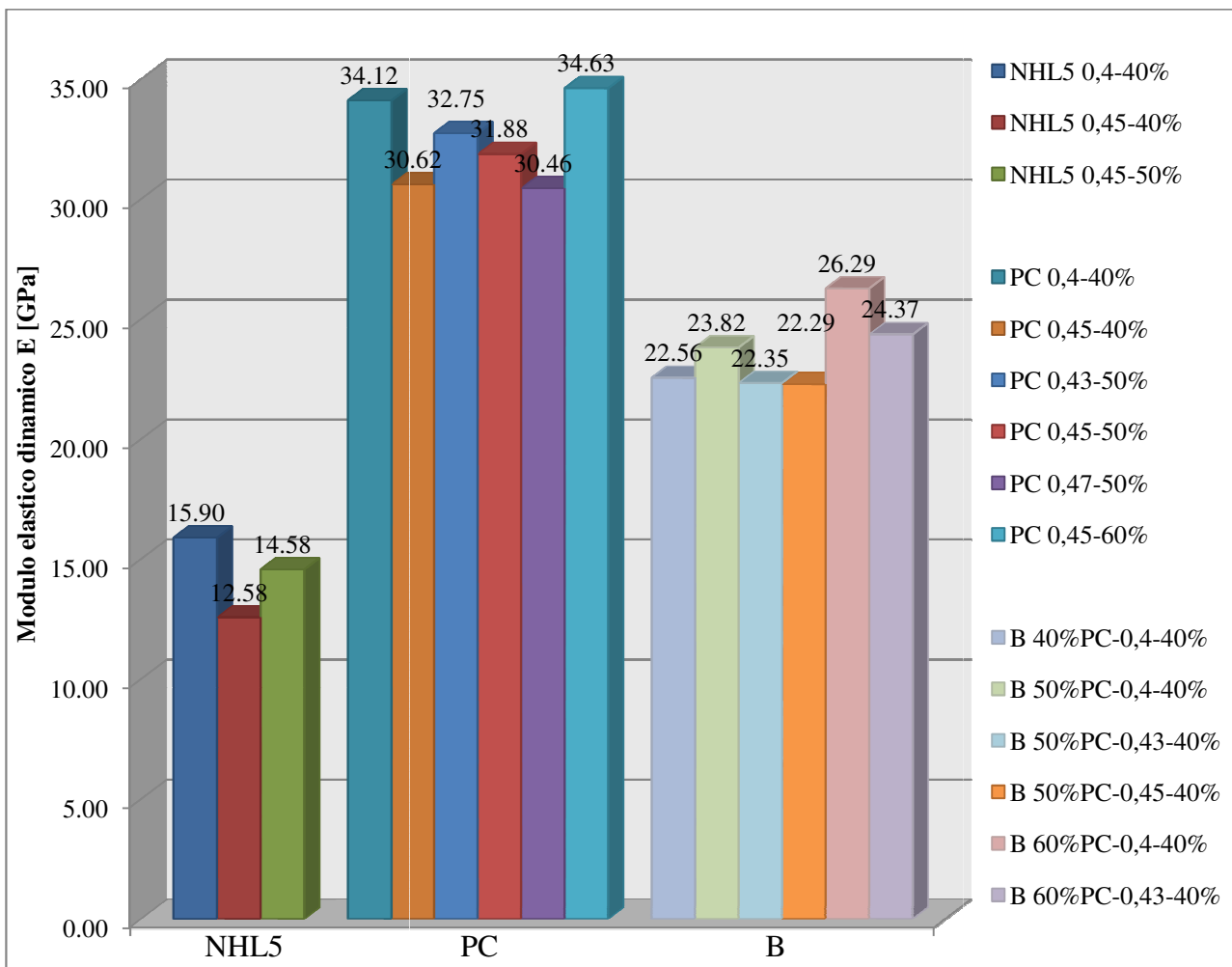


Figura 151 Modulo elastico dinamico delle malte preparate.

Le misure di ritiro sono state condotte secondo la normativa NFP15-433, misurando la deformazione a 8 giorni, 28, 60 e 80 giorni dei campioni precedentemente preparati e stagionati a 20°C e con il 50% di umidità relativa (UR), come riassunto in Figura 152. Il valore massimo di ritiro è stato osservato per le calce idrauliche, mentre quello inferiore per le malte di cemento Portland. Inoltre con l'aumentare del rapporto a/c si è osservato un aumento del ritiro per tutte e tre le famiglie di malta preparate.

Al fine di evitare la formazione di crepe in superficie, in letteratura sono riportati diversi valori di ritiro: 0,04% dopo 28 giorni e 0,1% dopo 1 anno (125). Tra le malte testate nessuna la malta rispetta il limite massimo a 28 giorni, visto che quelle con le migliori prestazioni superano già a 28 giorni il limite dello 0,1%. Da questo si evince come le calce idrauliche siano da escludere per eventuali interventi di ripristino, mentre per le altre due tipologie di malte bisognerà testare in sito la possibilità che si formino fenomeni di distacco dal supporto e l'eventuale utilizzo di agenti accoppianti.

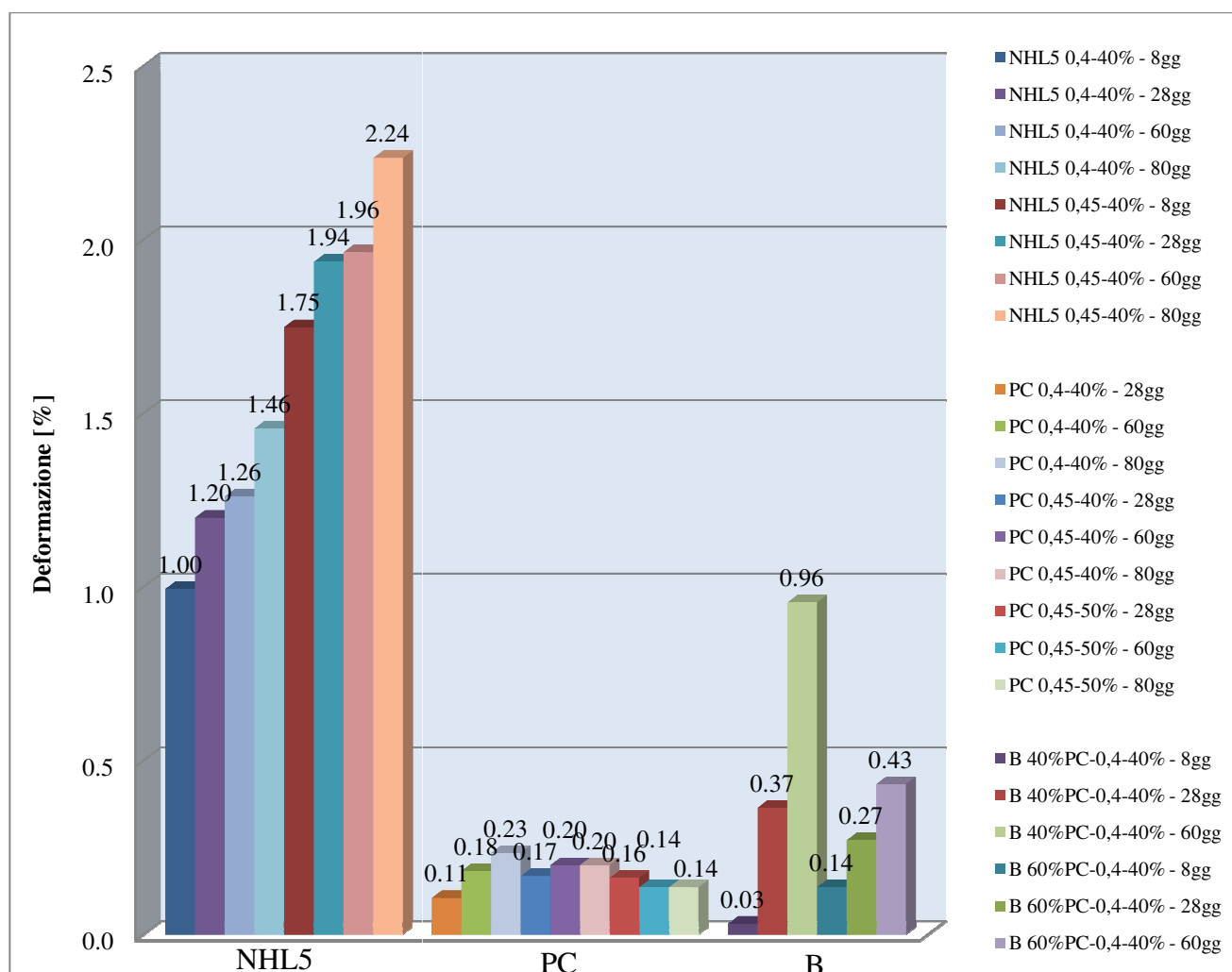


Figura 152 Deformazione percentuale delle malte preparate al variare del tempo.

La permeabilità al vapore acqueo è stata misurata secondo la normativa UNI EN 1015-19. Il test è stato condotto su dischi di malta (Φ 11cm, spessore 2cm) stagionati a 25°C e con il 95% UR, successivamente sigillati in appositi contenitori all'interno dei quali la pressione del vapore acqueo è mantenuta costante (93.2% UR a 20°C), usando una soluzione satura di KNO₃. Durante la prova i contenitori sono stati conservati in un locale a temperatura ed umidità costante (20°C, 55% UR). I risultati, riassunti in Tabella 15, rivelano una resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ) piuttosto alta per le malte a legante misto calce/cemento e con solo cemento, al contrario resistenze inferiori sono state riscontrate per i campioni a base di calce idraulica.

Tabella 15 Resistenza alla diffusione del vapore acqueo delle malte preparate

Nome campione	μ	Permeanza al vapore acqueo W_p		Nome campione	μ	Permeanza al vapore acqueo W_p	
		[kg/m ² sPa]	[g/m ² h·mm Hg]			[kg/m ² sPa]	[g/m ² h·mm Hg]
NHL5 0,4 - 40%	5.5	$1.7 \cdot 10^{-9}$	0.80	B 40%PC - 0,4 - 40%	8.7	$1.0 \cdot 10^{-9}$	0.50
NHL5 0,45 - 40%	5.2	$1.8 \cdot 10^{-9}$	0.84	B 50%PC - 0,4 - 40%	8.9	$1.0 \cdot 10^{-9}$	0.50
NHL5 0,45 - 50%	10.1	$9.0 \cdot 10^{-10}$	0.43	B 50%PC - 0,43 - 40%	8.3	$1.1 \cdot 10^{-9}$	0.51
PC 0,4 - 40%	11.6	$7.7 \cdot 10^{-10}$	0.37	B 50%PC - 0,45 - 40%	6.1	$1.3 \cdot 10^{-9}$	0.60
PC 0,45 - 40%	10.8	$8.2 \cdot 10^{-10}$	0.39	B 60%PC - 0,4 - 40%	11.1	$9.1 \cdot 10^{-10}$	0.44
PC 0,43 - 50%	14.6	$6.8 \cdot 10^{-10}$	0.33	B 60%PC - 0,43 - 40%	9.5	$9.7 \cdot 10^{-10}$	0.46
PC 0,45 - 50%	10.9	$7.2 \cdot 10^{-10}$	0.34				
PC 0,47 - 50%	9.2	$8.3 \cdot 10^{-10}$	0.40				
PC 0,45 - 60%	14.6	$6.7 \cdot 10^{-10}$	0.32				

La porosità aperta considerata è quella accessibile all'acqua e corrisponde al rapporto tra il volume totale dei pori aperti ed il volume apparente. Le tre tipologie di malte preparate presentano porosità aperte molto diverse tra loro (Figura 153). Le malte a base di calce idraulica hanno una porosità compresa tra il 27,23% ed il 31,58%, quelle con legante misto tra il 20,56% ed il 26,18%, mentre quelle a base di Portland risultano le meno porose (15,05-20,04%). Come si nota in figura, a parità di aggregato e di rapporto calce/cemento (per le malte a legante misto), la porosità aumenta con il rapporto acqua/cemento per tutte e tre le tipologie di malta. A parità di rapporto acqua/cemento la porosità diminuisce invece con l'aumento dell'aggregato. Confrontando tali risultati con quelli riscontrati sui campioni prelevati in sito, risulta evidente come le malte a base di calce idraulica risultino eccessivamente porose. Le malte a base di Portland e quelle a

legante misto risultano invece più adatte in quanto presentano porosità prossime ai due intervalli di porosità riscontrate nei campioni in sito: 21-25% per i campioni più porosi e 13-16% per quelli meno con porosi con valori minime del 4-6% . I frammenti prelevati in sito risultati più porosi, mostrano porosità prossime a quelle a legante misto, mentre quelli meno porosi sono prossimi alle malte di cemento.

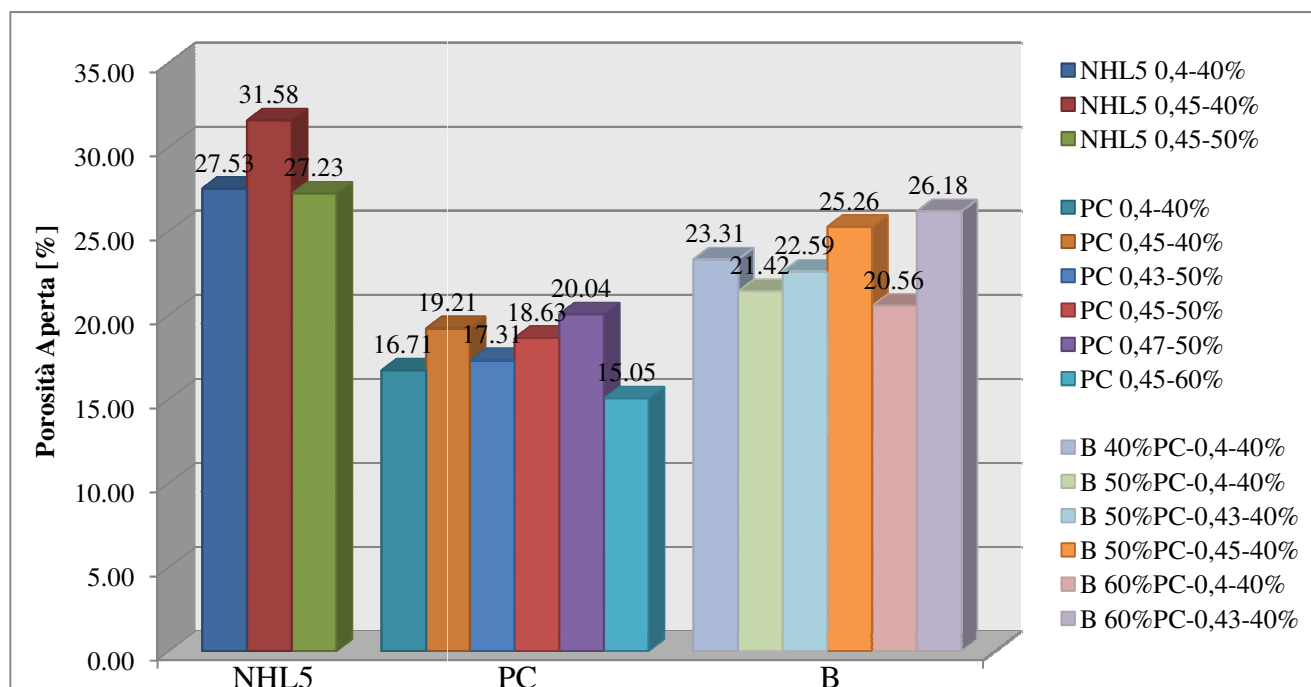


Figura 153 Porosità aperta (%) delle malte preparate.

Tra le malte preparate quelle a base di calce idraulica risultano le migliori per garantire una buona stuccatura anche per le decorazioni più complesse vista la loro plasticità allo stato fresco, ma nel breve periodo hanno una resistenza meccanica molto bassa e soprattutto valori di ritiro troppo elevati, con conseguente rischio di distacchi. Le malte a base di cemento Portland presentano invece resistenze meccaniche elevate ed una porosità prossima ai campioni meno porosi di pietra artificiale. Il loro spandimento alla tavola a scosse però è troppo elevato anche per rapporti a/c bassi (con conseguente difficoltà dell'operatore nell'applicazione), inoltre il loro modulo elastico risulta elevato rispetto a quanto riportato in letteratura per garantire una buona compatibilità con il supporto. Le malte bastarde riescono a mediare tra queste due condizioni opposte: possono essere ben applicate allo stato fresco, presentano discrete proprietà meccaniche in particolare nel lungo periodo, un modulo elastico entro i limiti consigliati dalla letteratura e porosità prossime ai campioni prelevati in sito. In tal caso però il ritiro rimane ancora un po' troppo elevato rispetto ai valori di letteratura, specie nel lungo

periodo. Per questi motivi andrebbe valutata la possibilità di utilizzare malte cementizie tixotropiche a ritiro compensato per garantire una migliore posa del prodotto nel caso di riparazione di elementi decorativi complessi, oppure malte bastarde con l'aggiunta di additivi antiritiro per compensare gli elevati valori di ritiro riscontrati ed evitare distacchi dal supporto. In entrambi i casi ulteriori campionature in sito aiuteranno la scelta della formulazione migliore.

6.1 Conclusioni

Tra le discipline di cui oggi si avvale il restauro, assume un ruolo di rilievo la diagnostica dei materiali per comprendere le loro caratteristiche ed i meccanismi di degrado associati, sebbene un errore in cui spesso si cade nell'affrontare il restauro degli edifici Liberty è proprio quello di trascurare la diagnostica valutandola troppo costosa per questo genere di edifici. Tali affermazioni in realtà non tengono conto del valore storico-artistico dei materiali cementizi del Liberty e dei costi che potrebbero generarsi a seguito dell'utilizzo di prodotti non idonei al supporto, e che le indagini in corso d'opera o a posteriori sono altrettanto costose.

Un problema che si presenta soprattutto per gli edifici moderni è la caratterizzazione del legante. Se infatti per gli edifici antichi il legante poteva essere gesso, calce aerea o la calce idraulica, per gli edifici moderni vanno aggiunti i cementi (cemento romano e Portland a cui vanno aggiunti tutti i prodotti locali che venivano realizzati in base alle materie disponibili in zona ed alla temperatura di cottura). Caratterizzare quindi le malte di questo periodo storico risulta più complesso ed al tempo stesso ugualmente importante, in quanto influenza direttamente la scelta della malta di ripristino. Attraverso il protocollo diagnostico messo a punto nella tesi (cap.3.2) e descritto in Figura 127 ed i casi di studio analizzati, è stato proposto un modo semplice ma efficace per determinare le principali caratteristiche di una malta moderna (tipo di legante, tipo di aggregato, porosità, rapporto legante-aggregato, forme di degrado) e come utilizzare tali informazioni nella scelta di una malta di ripristino compatibile con un supporto specifico.

Le decorazioni Liberty presentano inoltre il problema di essere il risultato di sperimentazioni e di tecniche al tempo non ancora ben definite, a metà strada tra artigianato e industrializzazione, e proprio per questo presentano una maggiore necessità di interventi di conservazione, per non perdere un patrimonio di saperi e tradizioni che fanno parte dell'identità e della cultura architettonica di un luogo. Come è stato mostrato, il contesto emiliano-romagnolo presenta caratteristiche proprie rispetto ai più famosi edifici Liberty torinesi e milanesi, in quanto espressione di una borghesia con minori disponibilità economiche e quindi con minore cura nei dettagli. Ciò non toglie però la ricerca di nuove forme espressive che rende tali decorazioni uniche nel loro genere. Diventa dunque fondamentale la sensibilizzazione dell'opinione pubblica e dei tecnici non solo del valore storico-artistico di tali edifici, ma anche dell'importanza

della diagnostica, poiché tra le cause che mettono in pericolo le architetture Liberty ci sono anche l'abbandono e gli errati interventi a cui gli edifici sono sottoposti da parte di operatori che non comprendono l'importanza della conservazione di tali architetture, compromettendone in tal modo la sopravvivenza e la trasmissione alle future generazioni. Il rischio è quindi di conservare il patrimonio architettonico del nostro paese solo se "d'epoca" e di riconosciuta fama, trascurando le forme artistiche moderne che caratterizzano le città italiane e che al tempo stesso le rendono uniche. Va comunque sottolineato che in alcune città (come Bologna e Torino) i nuovi piani regolatori hanno inserito vincoli architettonici per gli edifici più importanti del patrimonio Liberty e razionalista, dimostrando un cresciuto interesse da parte delle istituzioni nei confronti di tali tematiche.

I campioni prelevati presso villa Gina e villa Verde a Bologna e l'ex albergo Dorando Pietri a Carpi sono stati caratterizzati in una prima fase, attraverso indagini diagnostiche quali: diffrattometria a raggi X, termogravimetria, microscopia ottica in sezioni lucide, microscopia elettronica a scansione e porosimetria ad intrusione di mercurio. Dallo studio dei grani anidri è stato possibile stabilire la natura del legante (cemento Portland per tutti i campioni ad eccezione di G12), inoltre attraverso il confronto dei diffrattogrammi di sabbie di cava prelevate presso fiumi in provincia di Bologna e Modena è stato possibile definire anche il tipo di aggregato, grazie alla presenza di feldspati (albite ed ortoclasio), miche (muscovite) e cloriti (clinocloro). La porosimetria ad intrusione di mercurio ha rivelato inoltre una forte eterogeneità, sia nella distribuzione dei pori, che nella porosità aperta percentuale (variabile tra il 9% ed il 25,8%), a conferma del fatto che per garantire una buona compatibilità con il supporto l'intervento deve essere calibrato sulle singole tipologie di decorazioni. Le osservazioni al SEM hanno inoltre consentito di individuare cristalli di ettringite all'interno dei pori dei campioni più degradati (G11 e V11), mentre le cartografie con il SEM abbinate alla termogravimetria hanno consentito di fare alcune considerazioni sulla natura degli strati pittorici rinvenuti sulle pietre artificiali di villa Verde. I risultati ottenuti sono serviti per formulare delle malte per il restauro di tali edifici, in particolare villa Verde, per la quale i restauri sono attualmente in corso. Il restauro di tali elementi architettonici prevede la possibilità di ricostruire tramite colaggio in appositi stampi le pietre artificiali completamente degradate, oppure di stuccare le singole porzioni mancanti dopo la pulitura del supporto. Nel caso di villa Verde si prevede questa seconda modalità di intervento, in cui la compatibilità della malta di ripristino con il supporto

ricopre un ruolo fondamentale per la buona riuscita dell'intervento. Proprio per tale motivo sono state testate delle malte variando alcuni parametri quali: il tipo di legante, la percentuale di aggregato ed il rapporto acqua/cemento. Gli impasti così ottenuti sono stati in seguito caratterizzati al fine di valutarne alcune loro caratteristiche fisico-meccaniche, quali: lavorabilità allo stato fresco, resistenza meccanica, ritiro, modulo elastico dinamico, permeabilità al vapore acqueo e porosità. Tra le formulazioni testate le malte a base di calce idraulica NHL5 risultano poco adatte per gli interventi di risarcimento delle lacune a causa dell'elevato ritiro riscontrato e dell'elevata porosità. Le malte a legante cementizio risultano troppo fluide anche per bassi rapporti a/c, con conseguente difficoltà nella posa del prodotto in particolare per decorazioni complesse. In tal caso è consigliata l'aggiunta di un additivo plasticizzante poiché permetterebbe l'utilizzo di rapporto a/c più alti, a cui corrispondono porosità prossime ai campioni prelevati in sito (>20%). In aggiunta, si consiglia anche per tali malte, un additivo antiritiro in quanto si sono riscontrati valori superiori a quelli riportati in letteratura, specie nel breve periodo. Nel caso delle malte bastarde si consiglia solo l'utilizzo dell'additivo antiritiro, in grado di limitare i valori elevati riscontrati nei provini in laboratorio. L'utilizzo di un plasticizzante in tal caso non appare necessario, vista la facile applicazione di tali malte sul supporto. La scelta tra le due diverse formulazioni (a base di legante cementizio o misto) sarà condotta previa campionature in sito, al fine di verificarne anche la buona adesione con il supporto.

7. Bibliografia

1. **V. Alunno Rossetti.** *Il calcestruzzo, materiali e tecnologia.* Mc Graw-Hill, 2003, 2-4.
2. **C. Avenier, B. Rosier, D. Sommain.** *Ciment naturel*, Glénat, Grenoble, 2007.
3. **R. Blanchard.** *L'industrie des chaux et ciments dans le Sud-Est de la France*, Imprimerie allier père & fils, Grenoble, 1928, 117-124.
4. **D. Sommain.** *La durabilité des bétons de ciment Prompt naturel.* In : La durabilité des bétons, Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2008, 825-840.
5. **M. Racine.** *Jardins "au naturel", rocaïlle, grotesques et artistiques*, Actes Sud, Arles, 2001, 77-175. In : La durabilité des bétons, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 2008, 825-840.
6. **M. Culot, D. Drocourt.** Institut français d'architecture – Atelier du patrimoine de la ville de Marseille, *Marseille: la passion des contrastes*, Margada, 1991, 295-305.
7. Le centre historique de Marseille – 10, *Méthodes de Diagnostic, Banque de Données et Interevention : les façades en enduit-ciment à Marseille*, Atelier du Patrimoine de la Ville de Marseille.
8. Atelier du patrimoine de la ville de Marseille. *Marseille et ses quartiers: couleurs et traditions en architecture.* Édisud.
9. **M. G. Serito, A. Rava.** *Pietra artificiale: peculiarità d'uso e ipotesi di restauro.* Architettura e materiali del Novecento. Conservazione, restauro, manutenzione. Atti del convegno di Studi, Bressanone, 13-16 luglio 2004. Edizioni Arcadia Ricerche, Venezia, 2004, 739-748.
10. **M. Cavallini, C. Chimenti.** *La pietra artificiale, manuale per il restauro e il rifacimento delle decorazioni plastico - architettoniche delle facciate.* Alinea Editrice, Firenze, 1996.
11. **F. Sandrolini, E. Franzoni.** *Recovery of Art Nouveau European architecture: materials, technologies, degradation and conservation strategies.* Conference and brokerage event. The construction aspects of built heritage protection. Dubrovnik, Croatia, 14-17 ottobre 2006, 379-383.
12. **F. Sandrolini, E. Franzoni, H. Varum, A. C. Dell'Acqua.** *Materials and techniques of Art Nouveau Architecture in Italy and Portugal: a first insight for a*

European route to consistent Restoration. Restoration of Buildings and Monuments, Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, 15, 2, 2009, 129-144.

13. **F. Sandrolini, E. Franzoni, H. Varum, R. Nakonieczny.** *Materials and technologies in Art Nouveau architecture: Façade decoration cases in Italy, Portugal and Poland for a consistent restoration.* Informes de la Construcción, 63, 524, 5-11.

14. **G. Barilà.** *Innovazioni nel processo ed apparecchi per la fabbricazione di pietre artificiali.* Architettura e materiali del Novecento. Conservazione, restauro, manutenzione. Atti del convegno di Studi, Bressanone, 13-16 luglio 2004. Edizioni Arcadia Ricerche, Venezia, 2004, 271-280.

15. **C. Mele.** *Stucchi e cementi decorativi nelle architetture torinesi tra Ottocento e Novecento.* Lo stucco. Cultura, tecnologia, conoscenza. Atti del convegno di studi, Bressanone, 10-13 luglio 2001. Edizioni Arcadia Ricerche, Venezia, 2001, 81-86.

16. **A. Lucchesi.** *La pietra artificiale: aspetti tecnici, scientifici ed artistici da recuperare.* Progettare il costruito cultura e tecnica per il recupero del patrimonio architettonico del XX secolo. A cura di Guido Callegari e Guido Montanari, Milano, Franco Angeli, 2001, 121-138.

17. **C. Colombo.** *La stagione del cemento artistico a Milano 1900-1915.* Edilizia residenziale: costruire in Lombardia: 1880-1980. Electa, Milano, 1985, 61-76.

18. **R. Nelva.** *Pietra artificiale e calcestruzzo armato nella progettazione degli edifici torinesi tra Ottocento e Novecento.* Malte a vista con sabbie locali nella conservazione degli edifici storici : relazioni di ricerca e atti del Seminario 6-7-8 luglio 2000. Sirea, Torino, 2000, 1-12.

19. **C. Mele.** *Pietre artificiali e cementi decorativi.* Malte a vista con sabbie locali nella conservazione degli edifici storici : relazioni di ricerca e atti del Seminario 6-7-8 luglio 2000. Sirea, Torino, 2000.

20. *Le pietre artificiali nell'architettura.* Il cemento, 1, 1908 a. V, 17-18.

21. **G. Lavini.** *Il cemento armato.* L'architettura italiana, 3, 1912 a. VII, edizioni Crudo & C., Torino, 1.

22. **U. Monneret de Villard.** *Le forme architettoniche e la materia.* Il monitore tecnico, 1908 a. XIV, 435.

23. **M. P. Marzocchi, G. Pesci, V. Vandelli.** *Il Liberty in Emilia.* Introduzione di Rossana Bosaglia, coordinamento editoriale di Graziano Manni. Artioli Editore, Modena, 1988, 216-227.

24. **L. Baldazzi.** *Architettura Art Nouveau e Liberty in Bologna: materiali e procedimenti per il restauro di un patrimonio culturale.* Tesi di Laurea, Università di Bologna, Facoltà di Ingegneria, A.A. 2006/2007, relatore: prof. Franco Sandrolini, 168-211.
25. **R. Bossaglia, G. Capelli, C. Cresti, D. Riva, V. Savi, P. Serra Zanetti,** Sezione Architettura, in: *Il Liberty a Bologna e in Emilia Romagna*, Grafis Bologna, Bologna, 1977, 47.
26. **M. Nicoletti.** *L'architettura Liberty in Italia.* Editori Laterza, Roma-Bari, 1978, 327-328.
27. **L. Fontebuoni.** *Due momenti del Liberty a Pesaro.* Belli, Pesaro, 1978, 61-77.
28. **R. Nelva, B. Signorelli.** *Avvento ed evoluzione del calcestruzzo armato in Italia: il sistema Hennebique.* Edizioni di Scienza e Tecnica, Milano, 1990.
29. Artificial stone. *The American architect and building news*, 85, 1904, 62-63.
30. **L. Guardamagna D'Angelo.** *Casale Monferrato I cementifici.* Beni culturali provincia di Alessandria. Edizioni dell'Orso, Alessandria, stampa 1988, 5-6.
31. **C. Peroni.** *Cemento artistico e architettura.* Rassegna di architettura ed urbanistica, pubblicazione quadrimestrale dell'università degli studi di Roma, n° 103/104 (gen-ago), 2001 a.XXXV, 161-169.
32. **V. Giola.** *Pietra artificiale e cementi decorativi: contributo alla conoscenza.* *Recupero e conservazione*, 86, 2009, 64-71.
33. **V. Giola.** *Pietra artificiale e cementi decorativi: corrette tecniche di conservazione.* *Recupero e conservazione*, 87, 2009, 42-47.
34. **R. Nelva.** *Impiego dei calcestruzzi armati e di pietre artificiali nei primi anni di applicazione del beton armé in Italia.* *Calcestruzzi antichi e moderni: storia, cultura e tecnologia*, Atti del convegno di studi di Bressanone 6-9 luglio 1993. Libreria Progetto Editore, Padova, 1993, 157-170.
35. **R. Nelva, B. Signorelli.** *Impieghi della pietra artificiale e dei ferri battuti nelle architetture in Piemonte in epoca Art Nouveau.* Atti e rassegna tecnica, SIAT, Torino, 1999, 54-64.
36. **E. Rizzo, M. C. Sirchia.** *Liberty album del nuovo stile.* Dario Flaccovio Editore, 2008, 49, 84-85.
37. *Casa Lancia al Bocchetto di Milano.* *Il cemento* n°4, 1907 a.IV, 104-106.
38. **V. Giola.** *Cementi decorativi Liberty. Storia, tecnica, conservazione.* Edizioni Quasar, Roma, 2009.

39. *Società Italiana Chini*. Opuscolo pubblicitario della società. Il Cemento, 1906 a.III, 24.
40. **R. Bossaglia, V. Terraroli**. *Liberty a Milano*. Skira, Milano, 2003, 22-23, 111-125.
41. **J. Fritsch**. *Les pierres artificielles*. Librairie générale Scientifique et industrielle Desforges, Parigi, 1923.
42. **G. Pizzi, L. Formica**. *La conservazione delle facciate di Casa Campanini a Milano*. Tema, 3, 1994, 15-22.
43. **V. Giola**. *Per una caratterizzazione dei cementi decorativi Liberty*. Lo stucco. Cultura, tecnologia, conoscenza, Atti del convegno di studi, Bressanone, 10-13 luglio 2001. Arcadia Ricerche, Venezia, 2001, 358-363.
44. **E. Marcotte**. *Les pierres naturelles et artificielles*. Gauthier-Villars et C. Éditeurs, Parigi, 1928.
45. **E. Pinna**. *Cementi artistici e finiture nelle facciate di inizio secolo*. Superfici dell'architettura: le finiture. Atti del convegno di studi, Bressanone, 26-29 giugno 1990, Libreria progetto, Padova, 1990, 561-570.
46. **L. Gasperi**. *Ricettario pratico per l'edilizia*. Edizioni tecniche utilitarie, Bologna, 1942, 176-195.
47. **F. Bevilacqua, G. C. Grillini, R. Fabbri, C. Assirelli, F. Tassinari**. *La pietra artificiale nell'architettura degli anni trenta del '900: esempi in Emilia-Romagna. Problemi di degrado e tecniche di realizzazione*. Architettura e materiali del Novecento. Conservazione, restauro, manutenzione. Atti del convegno di Studi, Bressanone, 13-16 luglio 2004, edizioni Arcadia Ricerche, Venezia, 2004, 281-290.
48. *Scale ed altri lavori in pietra artificiale ed in cemento armato*. Il cemento n°16, 1912 a.IX, 243-247.
49. *Pietre artificiali di magnesia*. Il cemento, 1909 a.VI, 219.
50. *Cemento di magnesia e legno artificiale*. Il cemento, 1911 a.VIII, 201.
51. **J. Weber, K. Bayer, F. Pintér**. *19th Century "Novel" Buildings Materials: examples of various historic mortars under the microscope*. 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop 22-24 September 2010, Prague, Czech Republic, 397-404.
52. *Cemento di magnesia e legno artificiale*. Il cemento, 1911 a.VIII, 201.
53. *Pavimenti di xilolite*. Il cemento, 3, 1907 a.IV, 69.
54. **S. Garufi**. *I cementi decorativi*. Recupero e conservazione, 85, 2009, 72-74.

55. *Pietre artificiali a base di calce dolomitica*. Il cemento, 3, 1907 a.IV, 69.
56. *Il trattamento esterno delle superfici di cemento*. Il cemento, 1910 a.VII, 382.
57. *Un costoso esperimento con un béton di feldspato*. Il cemento, 12, 1920 a.XVII, 119-120.
58. **M. Cavallini, C. Chimenti.** *Pietre e marmi artificiali: manuale per la realizzazione e il restauro delle decorazioni plastico architettoniche di esterni ed interni*. Alinea Editrice, Firenze, 2000, 143-176.
59. *Nuovo processo di fabbricazione di pietre artificiali*. Edilizia moderna, IX, 1900.
60. *La preparazione delle forme in gesso ed altre in uso*. Il Cemento, 1912 a.IX, 38.
61. **L. Ghelfi, F. Molinari, V. Righi.** *Mestieri che si trasformano fra restauro e manutenzione*. Architettura e mestieri del restauro a cura di Raffaella Ferrari. Grafis Edizioni, Bologna, 1986, 161-165.
62. **C. Montagni.** *Materiali per il restauro e la manutenzione*. Utet, Torino, 2000, 134, 246-276.
63. **R. Grilli.** *La bottega della pietra artificiale materiali strumenti e tecniche tradizionali*. Architettura e materiali del Novecento. Conservazione, restauro, manutenzione. Atti del convegno di Studi, Bressanone, 13-16 luglio 2004, edizioni Arcadia Ricerche, Venezia, 2004, 483-492.
64. *Screpolature superficiali nelle costruzioni in calcestruzzo*. Il cemento, 1907 a.IV, 15.
65. **G. Beltrami.** *La pietra artificiale a Genova. Stato di conservazione e forme di degrado*. Architettura e materiali del Novecento. Conservazione, restauro, manutenzione. Atti del convegno di Studi, Bressanone, 13-16 luglio 2004, edizioni Arcadia Ricerche, Venezia, 2004, 639-646.
66. *Scale in pietra artificiale ed in cemento armato*. Il cemento, 13, 1912 a.IX, 196-197.
67. *Processo di decorazione della superficie del calcestruzzo*. Il cemento, 1908 a.V, 335.
68. *Finimento delle superfici di calcestruzzo*. Il cemento, 1907 a.IV, 14.
69. *Gli utensili pneumatici applicati alla lavorazione delle pietre artificiali*. Il Cemento, 1908 a.V, 67.
70. *Effetti architettonici nei getti di calcestruzzo*. Il cemento, 1907 a.IV, 321.
71. *La colorazione delle decorazioni in cemento*. Il cemento, 10, 1910 a.VII, 91-92.

72. *Colori per cemento*. Il cemento, 21, 1910 a.VII, 23.
73. *Le pitture sul cemento*. Il cemento, 6, 1904 a. I, 187-188.
74. *Lavori ornamentali in pietra artificiale*. Il cemento, 1910 a.VII, 21.
75. **G. Revere, C. Rossi.** *I materiali da costruzione*. Hoepli, Milano, 1925, 75-198.
76. *Presse, modelli ed accessori per la fabbricazione delle piastrelle in cemento*. Il cemento, 12, 1908 a.V, 326-328.
77. *Piastrelle per pavimentazione in granito artificiale*. Il cemento, 2, 1907 a.IV, 40.
78. *Lo sviluppo dell'industria dei lavori in cemento e delle pietre artificiali*. Il cemento, 12, 1908 a.V, 148.
79. **L.V. Masini.** *Il Liberty: Art nouveau*. Giunti, Firenze, 2000.
80. www.bluffton.edu/~sullivanm/france/rancy/perret.html data di consultazione 22-10-11
81. <http://leblog.exuberance.com/2008/03/frank-lloyd-wri.html> data di consultazione 22-10-11
82. *Le forme architettoniche nel cemento armato*. Il cemento, 4, 1907 a.IV, 88-90.
83. *Macchina "Berbet" per la fabbricazione dei blocchi cavi di calcestruzzo*. Il cemento, 12, 1908 a.V, 324.
84. *Procedimento per la colorazione dei silico-calcarei*. Il cemento, 10, 1908 a.V, 269.
85. **V. Giola.** *Patologie e durabilità della pietra artificiale: un approccio analitico*. Architettura e materiali del Novecento. Conservazione, restauro, manutenzione. Atti del convegno di Studi, Bressanone, 13-16 luglio 2004. Edizioni Arcadia Ricerche, Venezia, 2004, 477-482.
86. **M. Zerbinatti.** *Il restauro di manufatti in pietra artificiale: messa a punto e sperimentazione di sistemi compatibili di pulitura, stuccatura, risarcimento*. Architettura e materiali del Novecento. Conservazione, restauro, manutenzione. Atti del convegno di Studi, Bressanone, 13-16 luglio 2004. Edizioni Arcadia Ricerche, Venezia, 2004, 1161-1170.
87. **M. Grecchi.** *Il risanamento del Liberty*. Verniciature e Decorazioni, VI, 1990, 6-16.
88. **R. Fant.** *Il recupero dei cementi decorativi, le patologie, i metodi di intervento e i materiali per il recupero delle facciate in pietra artificiale. Dalla pulitura alla stuccatura, dal consolidamento alla protezione*. Specializzata, 140, 2005, BE-MA Editrice, Milano, 960-965.

89. **G.G. Amoroso, V. Fassina**, *Stone decay and conservation*, Elsevier, New York, 1983, 135-150.
90. **R. Gagné, L. Linger**. *La durabilité des bétons en ambiance hivernale rigoureuse*. In : *La durabilité des bétons*, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 2008, 387-486.
91. **A. Lucchesi, S. Ravinale**. *Recupero della pietra artificiale nell'architettura del primo Novecento*. *Curare il moderno, i modi della tecnologia*, a cura di Pier Giovanni Bardelli, Elena Filippi, Emilia Garda, Marsilio Editori, Venezia, 2002, 247-256.
92. **A. Lucchesi, S. Ravinale**. *Comparazione fra varie tipologie di intervento utilizzate per il recupero delle pietre artificiali nell'architettura del primo '900*. *La prova del tempo: verifiche degli interventi per la conservazione del costruito: Atti del Convegno di studi*, Bressanone, 27-30 giugno 2000, Marghera, Edizioni Arcadia Ricerche, Venezia, 2000.
93. **P. Naldi**. *Il fantasma Liberty*, Repubblica – sezione Bologna, 3 giugno 2009, 11.
94. **P. Lipparini**. *Ingegneria-architettura: la conciliazione improbabile di Attilio Muggia*, in: *Norma e arbitrio: architetti e ingegneri a Bologna 1850-1950*, a cura di Giuliano Gresleri, Pier Giorgio Massaretti. Marsilio, Venezia, 2001, 163-173.
95. **G. Muggia**. *Prof. Ing. Attilio Muggia, dell'Università di Bologna. Note biografiche*, tip. Compositori, Bologna, 1951. Disponibile anche in rete al sito: www.dapt.ing.unibo.it/nuovosito/Insegnamenti/arc_tec1/Attilio%20Muggia.pdf
96. **M. Iodice**. *Borgo Panigale, antiche ville in un quartiere moderno*. Testi di Ramona Loffredo, Pier Luigi Perazzini, Giancarlo Ranuzzi de' Bianchi, Gianna Paola Tomasina, con la collaborazione di Carlotta Grillone. Comune di Bologna, Bologna, 2004, 74-78.
97. **A. Muggia**. *Villa Gina a Borgo Panigale presso Bologna*. *L'edilizia moderna*, periodico mensile di architettura pratica e costruzione, a. XIV, fasc. XI, 1905.
98. **V Vandelli, G. Pesci**. *Il Liberty in Emilia*. coordinamento editoriale di Graziano Manni, Artioli Editore in Modena, Modena, 1988, 78, 114, 196.
99. **C. Cresti**. *Il Liberty a Bologna e in Emilia Romagna*. Grafis Bologna, Bologna, 1977, 37.
100. **G. Gresleri**. *Bologna - Guida di architettura*. Edizioni Allemandi, Bologna, 2004, 176.

101. **M. B. Bettazzi.** *Bologna e l'innovazione tecnologica fra Otto e Novecento: note attorno al carteggio Attilio Muggia – François Hennebique.* Disponibile presso il sito: <http://www.aising.it/docs/atticonvegno/p557-564.pdf>
102. **B. Middendorf, J. J. Hughes, K. Callebaut, G. Baronio, I. Papayianni.** *Investigative methods for the characterisation of historic mortars – part 1: Mineralogical characterization,* Materials and Structure 38 (2005) 761-769.
103. **J. Weber, N. Gadermayr, R. Kozłowski, D. Mucha, D. Hughes, D. Jaglin, W. Schwarz.** *Microstructure and mineral composition of Roman cements produced at defined calcination conditions,* Materials Characterization 58 (2007) 1217–1228.
104. **K. Callebaut, J. Elsen, K. Van Balen, W. Viaene.** *Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium) Natural hydraulic lime or cement?* Cement and Concrete Research 31 (2001) 397-403.
105. **E. Cailleux.** *Compatibilité de mortiers de réparation avec les bétons anciens de la région Rhone-Alpes.* Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussees.
106. **M. Thiery.** *Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires. Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydrauliques.* Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, 14.
107. **C. Gosselin, K. L. Scrivener, S. B. Feldman.** *Hydration of Roman cements used for architectural restoration,* 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop 22-24 September 2010, Prague, Czech Republic, 993-1004.
108. **A. Moropoulou, A. Bakolas, K. Bisbikou.** *Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques,* Thermochemica Acta 269/270 (1995) 779-795.
109. **R. Ylmén, U. Jäglid, B.M. Steenari, I. Panas.** *Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques,* Cement and Concrete Research 39 (2009) 433–439.
110. **M.J. Varas, M. Alvarez de Buergo, R. Fort.** *Natural cement as the precursor of Portland cement, Methodology for its identification,* Cement and Concrete Research 35 (2005) 2055 – 2065.
111. **E. T. Stepkowska, J. M. Blanes, C. Real, J. L. Perez-Rodriguez.** *Hydration products in two aged cement pastes,* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 82 (2005) 731–739.

112. **D. H. Campbell.** *Microscopical examination and interpretation of Portland cement and clinker*, Portland Cement Association, Skokie, USA, 1999.
113. **V. Furlan, R. Pancella.** *Examen microscopique en lumière réfléchie de ciments, bétons et mortiers*, Chantiers/Suisse, Vol. 13 (1982) 25-30.
114. **C. Gosselin, V. Verges-Belmin, A. Royer, G. Martinet.** *Natural cement and monumental restoration*, Materials and Structures (2009) 42, 749-763.
115. **E. Cailleux, E. Marie-Victoire, D. Sommain, E. Brouard.** *Microstructure and weathering mechanisms of natural cements used in the 19th century in the French Rhône-Alpes region*, Proceedings on the international workshop on: Repair mortars for historic masonry, Deft, 26th-28th January 2005.
116. **M. Bouichou, E. Marie-Victoire, E. Cailleux, D. Sommain.** *Compatibility of Repair Mortars with 19th Century Natural Cement Cast Stone from the French Rhône-Alpes Region*, 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop, 22-24 September 2010, Prague, RILEM Publications s.a.r.l., Bagneux (France), 2010, 927-936.
117. **H. Hornain.** *Dégradation du béton liées à l'action des sulfates et aux phénomènes d'alcali-réaction*, in : *Grandeurs associées à la durabilité des bétons*, Association Française de Génie Civil, Réseau Génie Civil & Urbain, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2007, 207-208.
118. **B. Middendorf, J. J. Hughes, K. Callebaut, G. Baronio, I. Papayianni.** *Investigative methods for the characterisation of historic mortars – part 2: Chemical characterization*, Materials and Structure 38 (2005) 771-780.
119. **L. Rampazzi, R. Bugini.** *St. Lorenzo Basilica in Milan: integral approach to characterisation of historical mortars*, e-Preservation Science 3 (2006) 21-26.
120. **C. Sabbioni, G. Zappia, N. Ghedini, G. Gobbi, O. Favoni.** *Black crusts on ancient mortars*, Atmospheric Environment vol. 32-2 (1998) 215-223.
121. **J. Elsen.** *Microscopy of historic mortars - a review*, Cement and Concrete Research 36 (2006) 1416–1424.
122. **M. Arandigoyen, J.I. Alvarez.** *Pore structure and mechanical properties of cement–lime mortars*, Cement and Concrete Research 37 (2007) 767–775.
123. **A. Moropoulou, A. Bakolas, K. Bisbikou.** *Investigation of the technology of historic mortars*, Journal of Cultural Heritage 1 (2000) 45–58.

124. **J.E. McDonald, A.M. Vaysburd, R.W. Poston.** *Performance criteria for dimensionally compatible repair materials*, Fifth international conference CANMET/ACI, Barcelona, 4-9 June 2000, V. M. Malhotra ed., vol 2, 931-947.

125. **M. Bouichou, E. Cailleux, E. Marie-Victoire, D. Sommain.** *Evaluation of compatible mortars to repair 19th century natural cement cast stone from French Rhône-Alpes region*, Conservar Património no. 8 , 59-66, 2008.